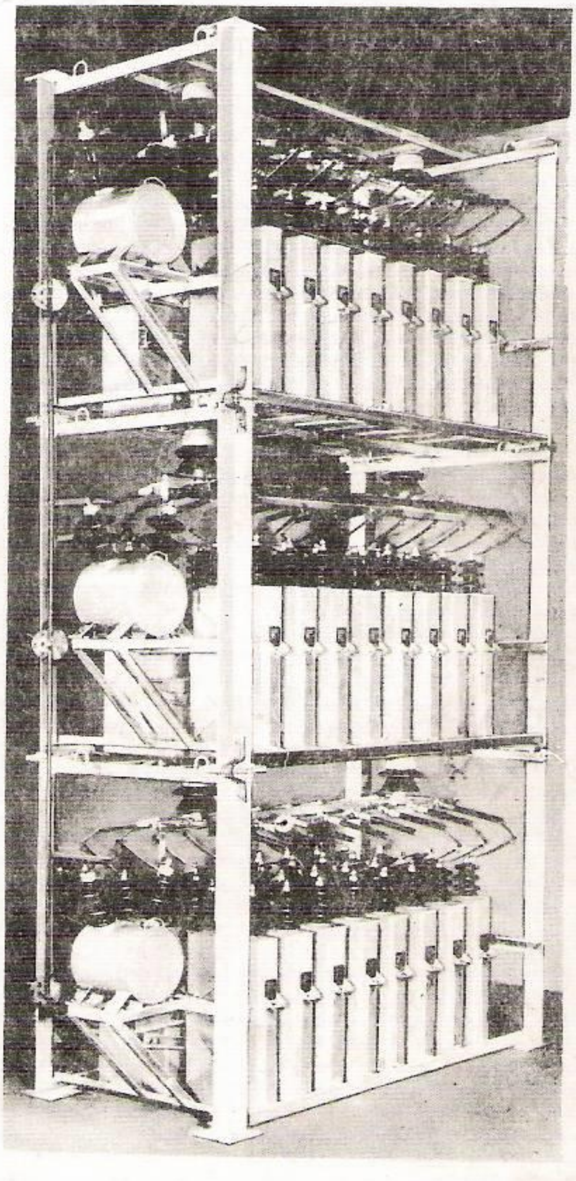
مجموعة كتب

الأسس العلمية والخبرة العملية في الهندسة

الكتاب الرابع



المكثفات (تحسين معامل القدرة)

(Power Factor Correction)

د. عبد المنعم موسى
كلية الهندسة
جامعة الإسكندرية

دار الراتب الجامعية

المكثفات

(تحسين معامل القدرة)

(Power Factor Correction)

بسم الله الرحمن الرحيم

حقوق الطبع والنشر محفوظة للناشر

دار الراتب الجامعية

© حقوق الطبع والنشر والاقتباس مملوكة لدار الراتب الجامعية يحظر تصوير جزء أو برنامج من هذا الكتاب، أو تخزينه بأي وسيلة خزن أو طبع دون الحصول على اذن خطي ممهور وموقع من ادارة النشر بدار الراتب الجامعية في بيروت

الناشر:

دار الراتب الجامعية: بيروت/لبنان
سلاسل سوفنير

ص.ب ١٩/٥٢٢٩ بيروت - لبنان
تلكس: Rateb - LE 43917
تلفون: 317169 - 313923 - 862480

١٩٩٤

مجموعة كتب

الأسس العلمية والخبرة العملية في الهندسة الكهربية

الكتاب الرابع

المكثفات

(تحسين معامل القدرة)
(Power Factor Correction)

د. عبد المنعم موسى

كلية الهندسة

جامعة الإسكندرية

دار الراتب الجامعية

DAR EL-RATEB AL-JAMIAH

اهــداء

إلى كل مهندس في وطننا العربي

يرنو إلى غدٍ أفضل

مقدمة

إن الهدف الأساسي من وضع هذا الكتاب هو تزويد المهندس بوسيلة واضحة ومباشرة لاستخدام المكثفات في تحسين معامل القدرة في المنظومات الصناعية بصفة عامة. ولقد وَجَدت أن هذا الكتاب هو مجال مناسب لتوضيح مفهوم القدرة المردودة وأسباب تواجدها في الدوائر الكهربية والفرق بينها وبين القدرة الفعالة. إن مفهوم القدرة المردودة يسبب بعض اللبس لكثير من المهندسين، كما أن المعنى الطبيعي لمعامل القدرة والسبب في ضرورة رفع قيمته من الأمور غير الواضحة في كثير من الأحيان.

يبدأ الكتاب في الباب الأول بإعطاء فكرة سريعة وواضحة عن المكثفات من حيث التكوين والمواد المستعملة في صناعتها. كما يقدم شرحاً وافياً للكميات المرتبطة بعمل المكثف وكذلك طرق الشحن المختلفة. ويحتوي هذا الباب أيضاً على طرق التوصيل والشحن والتفريغ علاوة على أداء المكثف في كل من دوائر التيار الثابت والتيار المتردد.

تم تخصيص الباب الثاني لشرح مفهوم القدرة ومعامل القدرة مع التركيز على القدرة المردودة على أساس تواجدها داخل المكثفات، ثم علاقة ذلك كله بأداء الأجهزة والآلات المختلفة في منظومات القوى الكهربية. وينتهي الباب بتقديم لفكرة تحسين معامل القدرة والأجهزة المستعملة في ذلك.

يقدم الباب الثالث دراسة عامة لتأثير معامل القدرة على أجهزة الخدمة الرئيسية وهي المولدات والمحولات وخطوط النقل وكابلات التغذية والتوزيع. كما يوجد في هذا الباب دراسة مفيدة لارتباط معامل القدرة بكل من تنظيم

الجهد ومفقودات المنظومة. وينتهي الباب بتقديم شرح وافٍ لطرق حساب مقنن المكثف اللازم لتحسين معامل القدرة بأي كمية مطلوبة.

يهتم الباب الرابع بدراسة موضوع تحسين معامل القدرة في الصناعة، حيث يقدم عرضاً وافياً *لخطوات وطرق استخدام المكثفات لتحسين معامل* القدرة لكل من المحركات والمحولات مع بيان العوامل والاحتياطات الواجب اعتبارها في هذا الشأن. كما يعطي فكرة سريعة عن تحسين معامل القدرة لكل من الأفران وأجهزة اللحام الكهربية.

يختص الباب الخامس بمواصفات تركيب المكثفات من حيث الشروط الواجب توافرها في المكثف والموصلات المستخدمة والتجاوزات المسموحة وطرق الحماية والتحكم.

ويحتوي الكتاب على عدد وفير من الجداول المفيدة والتي يمكن استخدامها بصورة مباشرة وبدقة كافية، كما يحتوي الكتاب على عدد من العلاقات ذات الفائدة العملية.

أود أن أشير هنا إلى أنني لم أقصد بوضع هذا الكتاب أن يكون مرجعاً للمكثفات، وإنما الهدف - كما ذكرت - هو أن يكون دليلاً لاستخدام تلك المكثفات في تحسين معامل القدرة. كما راعيت بقدر الإمكان أن يكون الكتاب مناسباً لجميع المهندسين المرتبطة أعمالهم بموضوع تحسين معامل القدرة.

أحمد الله وأسأله التوفيق والقبول. وأشكر زملائي وطلابي الذين شجعوني وشدوا من أزري حتى انتهيت من هذا الكتاب ومن سلسلة كتب الأسس العلمية والخبرة العملية في الهندسة الكهربية. وأقدم شكراً خاصاً للأخ العزيز صاحب ومدير دار الراتب الجامعية الذي كان لحسن تعاونه وتفهمه العميق لصعوبة وثقل عبء هذه الكتب أحسن الأثر في إخراجها.

والحمد لله في الأولى والآخرة.

عبد المنعم موسى

بيروت ١٩٩٣

الفهرس

إهداء ٤
مقدمة ٥
الباب الأول: المكثفات ١١
١ ـ ١ مقدمة ١١
١ ـ ٢ التركيب ١٢
١ ـ ٢ ـ ١ مادة العزل ١٣
١ ـ ٣ الكميات والعلاقات الأساسية ١٣
١ ـ ٣ ـ ١ سماحية العازل ١٥
١ ـ ٣ ـ ٢ الشحنة الكهربية ـ الفيض الكهربي ١٦
١ ـ ٣ ـ ٣ فرق الجهد ٢١
١ ـ ٣ ـ ٤ سعة المكثف ٢٢
١ ـ ٤ توصيل المكثفات ٢٣
١ ـ ٤ ـ ١ التوصيل على التوالي ٢٣
١ ـ ٤ ـ ٢ التوصيل على التوازي ٢٤
١ ـ ٥ الطاقة المختزنة في المكثف ٢٥
١ ـ ٦ المكثفات بأكثر من عازل ٢٦
١ ـ ٧ شحن المكثف ٢٧
١ ـ ٨ تفريغ المكثف ٣١
١ ـ ٩ المكثفات في دوائر التيار المتردد ٣٣
١ ـ ١٠ المفاعلة الحثية ٣٨

الباب الثاني: القدرة ومعامل القدرة ٤١
٢ ـ ١ مقدمة ٤١
٢ ـ ٢ معامل القدرة ٤٢
٢ ـ ٢ ـ ١ مثلث القدرة ٤٦
٢ ـ ٣ تأثير معامل القدرة ٤٨
٢ ـ ٤ تحسين معامل القدرة ٤٩
٢ ـ ٥ مصادر القدرة المردودة ٥٢
٢ ـ ٦ دور المكثفات في تعويض الأحمال ٥٧

الباب الثالث: تحسين معامل القدرة ـ دراسة عامة ٥٩
٣ ـ ١ مقدمة ٥٩
٣ ـ ٢ تأثير معامل القدرة على أجهزة الخدمة ٦٠
٣ ـ ٢ ـ ١ تأثير معامل القدرة على المولدات ٦٠
٣ ـ ٢ ـ ٢ تأثير معامل القدرة على المحولات ٦٣
٣ ـ ٢ ـ ٣ تأثير معامل القدرة على خطوط النقل ٦٥
٣ ـ ٢ ـ ٤ تأثير معامل القدرة على كابلات التوزيع ٦٧
٣ ـ ٣ ارتباط تنظيم الجهد بمعامل القدرة ٦٧
٣ ـ ٣ ـ ١ حساب تنظيم الجهد عملياً ٧٠
٣ ـ ٤ المفقودات ومعامل القدرة ٧٢
٣ ـ ٤ ـ ١ مفقودات القدرة الفعالة ٧٢
٣ ـ ٤ ـ ٢ مفقودات القدرة المردودة ٧٨
٣ ـ ٥ مقارنة بين مصادر تحسين القدرة المردودة ٨٠
٣ ـ ٦ حساب حجم المكثف ٨٦
٣ ـ ٦ ـ ١ طريقة الحساب ٨٦
٣ ـ ٦ ـ ٢ الطريقة البيانية ٨٧
٣ ـ ٦ ـ ٣ باستخدام الجداول الجاهزة ٨٨
٣ ـ ٦ ـ ٤ باستخدام المنحنيات ٨٩

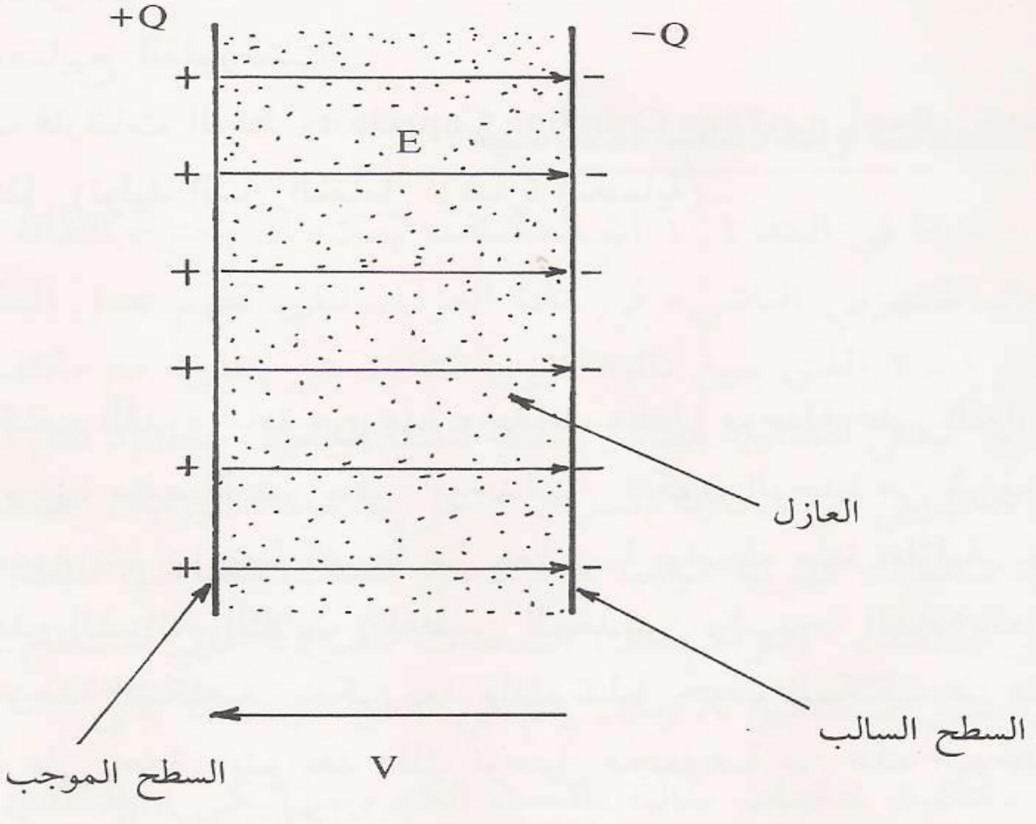
الباب الرابع: تحسين معامل القدرة في الصناعة ٩٩
٤ ـ ١ مقدمة ٩٩
٤ ـ ٢ تحسين معامل قدرة المحركات ١٠١
٤ ـ ٢ ـ ١ التوصيل الفردي ١٠٤
٤ ـ ٢ ـ ٢ التوصيل التجميعي ١١٧
٤ ـ ٢ ـ ٣ التوصيل المركزي ١١٩
٤ ـ ٣ تحسين معامل قدرة المحولات ١٢٠
٤ ـ ٤ أجهزة اللحام والأفران الكهربية ١٢٤

الباب الخامس: مواصفات التركيب ١٢٩
٥ ـ ١ مقدمة ١٢٩
٥ ـ ٢ الطاقة المختزنة في المكثف ١٢٩
٥ ـ ٣ الموصلات ١٣٠
٥ ـ ٤ التجاوزات المسموحة ١٣٣
٥ ـ ٤ ـ ١ تجاوز الجهد ١٣٤
٥ ـ ٤ ـ ٢ تجاوز درجة الحرارة ١٣٤
٥ ـ ٤ ـ ٣ تجاوز التيار ١٣٦
٥ ـ ٥ الحماية والتحكم ١٣٧
٥ ـ ٦ الاختيار تبعاً للمواصفات الأمريكية ١٤٠
مراجع الكتاب ١٤٣

المكثفات Capacitors

١.١ مقدمة

يتكون المكثف عادة من أي سطحين معدنيين بينهما فراغ مملوء بالهواء أو بأي مادة عازلة أخرى. عند التأثير بفرق في الجهد بين سطحي المكثف المعدنيين (قطبي المكثف) مقداره V ڤولت يتولد مجال كهربي E ڤولت/متر داخل المادة العازلة كما تظهر شحنتان كهربيتان (+Q) و (−Q) على سطحي المكثف، وتقاس هذه الشحنة بالكولوم. يبين الشكل ١ ـ ١ هذه الفكرة.



شكل ١ ـ ١ مكونات وكميات المكثف

إن العمل الأساسي للمكثف هو إمكانية منع مرور التيار الكهربي تحت ظروف معينة، كما يمكن للمكثف تخزين الطاقة الكهربية داخل المجال الكهربي الناشيء بين سطحيه. وقد بدأ استخدام المكثفات في منظومات القوى الكهربية منذ أكثر من ستين عاماً، واتسع استخدام تلك المكثفات وتنوعت الأغراض من صناعتها لتشمل ما يأتي:

١ ـ تحسين معامل القدرة.
٢ ـ التقويم.
٣ ـ ترشيح التوافقيات.
٤ ـ مكثفات التوالي في خطوط النقل.
٥ ـ حماية التمور Surge arresters.
٦ ـ تنعيم التيار الثابت.
٧ ـ تكوين الموجات الدفعية في مولدات الدفع impulse generators.
٨ ـ تقسيم الجهد في الدوائر الكهربية.
٩ ـ مكثفات تخزين الطاقة.
١٠ ـ تشغيل المحركات.
١١ ـ مكثفات مصابيح الفلورسنت.
١٢ ـ المكثفات قارنات الخط Line Coupling Capacitors في أعمال حماية خطوط النقل (توليد التيار الحامل لإشارة الحماية).

٢.١ التركيب

يتكون مكثف القدرة عادة من عدة وحدات Units موصلة على التوازي. يتم تصنيع كل وحدة منفصلة عن باقي الوحدات. تتكون الوحدة من شريحتين من رقائق الألومنيوم يتم عزلهما كهربياً عن بعضهما بواسطة مادة عازلة. ويتم بعد ذلك لف هذه الشرائح الثلاث (القطبين المعدنيين وشريحة المادة العازلة بينهما) لتكوين وحدة المكثف. يمكن بعد ذلك تقليل حجم المكثف عن طريق كبس كل وحدة على حدة. يتم بعد ذلك توصيل مجموعة من هذه الوحدات على التوازي لتكوين المكثف الكلي.

١.٢.١ مادة العزل

استعمل الورق المشبع بزيت المحولات كمادة للعزل داخل المكثفات حتى أواخر الخمسينات من هذا القرن. وعندما ظهرت مادة الأسكاريل Askarel كمادة عازلة غير قابلة للاشتعال تم استخدامها كسائل عزل لورق المكثفات على نطاق واسع. وبحلول عام ١٩٧٥ تأكد تماماً أن تلك المادة تمثل خطراً على البيئة وتم إيقاف إنتاجها في معظم دول العالم. ومع تطور الصناعات الكيماوية وصناعات البتروكيماويات تم إنتاج مواد عزل جيدة يتم استخدامها الآن في المكثفات كمواد عزل صلبة، ولعل أشهرتلك المواد هي رقائق البولي بروبلين Polyproplene وبعض مواد الغمر العازلة الأخرى التي تُعرف عادة بأسمائها التجارية. وعلى وجه العموم فإن المكثفات الموجودة حالياً في الأسواق يمكن تقسيمها من حيث مواد العزل إلى ما يأتي:

١ ـ مكثفات ذات عوازل مغمورة في سائل غمر Impregnated insulation.

٢ ـ مكثفات جافة ذات عوازل مغطاة بمادة راتينجية ثابتة حرارية thermosetting resin.

٣.١ الكميات والعلاقات الأساسية

ذكرنا في البند ١.١ أن المكثف يمكنه أن يختزن الطاقة الكهربية داخل المجال الكهربي الناشيء في مادة العزل. لكي نفهم عمل المكثف نشير إلى الشكل ١ ـ ٢ الذي يبين دائرة كهربية تتكون من بطارية مع مكثف ومقاومة على التوالي. تمثل البطارية مصدر الطاقة لتلك الدائرة. بمجرد قفل المفتاح "S" يبدأ التيار الكهربي في محاولة السريان داخل الدائرة الكهربية، حيث يتم ذلك على صورة شحنات كهربية موجبة تتحرك من القطب الموجب للبطارية نحو السطح A من المكثف. وتتراكم تلك الشحنات الموجبة على السطح A نظراً لوجود العازل بين السطحين A و B. يتم في نفس الوقت ما يأتي:

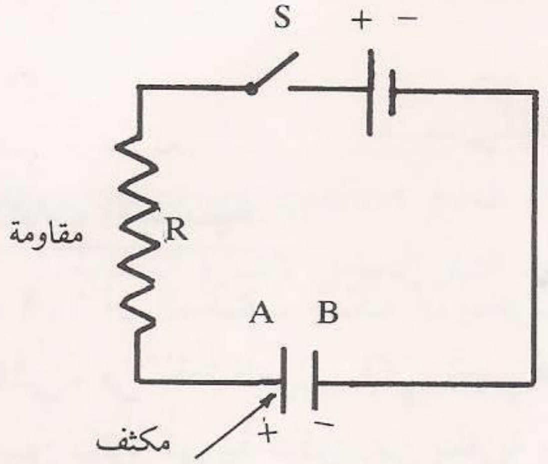
أ ـ تتكون شحنات سالبة بالحث الكهروستاتيكي Electrostatic induction على السطح B من المكثف.

ب ـ يرتفع فرق الجهد بين السطحين المعدنيين A و B مع استمرار تراكم الشحنات الموجبة على السطح A وتكون الشحنات السالبة على السطح B.

حـ ـ يرتفع المجال الكهربي Electric field بين السطحين A و B مع استمرار ارتفاع فرق الجهد بينهما.

د ـ تستمر هذه العملية إلى أن يصل فرق الجهد بين السطحين A و B إلى قيمة مساوية لجهد البطارية وعندئذٍ يتوقف مرور التيار (تراكم الشحنات) وبذلك يكون قد تم شحن المكثف.

إن عملية شحن المكثف بالطريقة السابق توضيحها يحتاج إلى طاقة يتم سحبها من مصدر الطاقة في الدائرة (البطارية)، حيث قد احتاجت تلك العملية إلى فترة زمنية مرَّ فيها تيار كهربي تم سحبه من البطارية. وتجدر الإشارة هنا إلى أن هذه الطاقة التي تم بها شحن المكثف لم تتبدد وإنما تم استخدامها في إنشاء المجال الكهربي داخل مادة عزل المكثف. ونلاحظ هنا ما يأتي:



شكل ١ ـ ٢ شحن مكثف بواسطة بطارية

١ ـ لم نعتبر في الشرح السابق الجز من الطاقة الذي تبدد أثناء مرور تيار البطارية خلال المقاومة R، حيث أن وجود هذه المقاومة ضروري لحماية المكثف.

٢ ـ يمكن استرجاع الطاقة المختزنة دخل المكثف عن طريق تفريغ المكثف مثلاً خلال مقاومة.

٣ ـ إن عملية شحن المكثف هي عملية كهربية تشبه عملية ضغط زنبرك Spring في المنظومات الميكانيكية، حيث تحتاج تلك العملية إلى طاقة خارجية يختزنها الزنبرك ويمكن استرجاعها من الزنبرك.

٤ ـ إن المكثف المثالي لا يستهلك الطاقة الكهربية وإنما يختزنها فقط.

٥ ـ تتغير قيمة شدة المجال الكهربي E بتغير فرق الجهد بين طرفي المكثف. وتعتمد صورة العلاقة بين E وفرق الجهد V على شكل المكثف وأبعاده ونوع مادة العازل.

٦ ـ إن ارتفاع قيمة شدة المجال الكهربي هو المسؤول عن حدوث انهيار كهربي breakdown في مادة العزل. وتُعرف قيمة أقصى شدة كهربية يمكن للعازل أن يتحملها بالشدة الكهربية للعازل dielectric strength.

ويجب تصميم المكثف بحيث يكون أقصى شدة مجال كهربي يتعرض له عازل المكثف أقل بكثير من الشدة الكهربية له.

١.٣.١ سماحية العازل Dielectric Permittivity

السماحية هي خاصية ترتبط بقدرة العازل على تخزين الطاقة داخل المجال الكهربي الناشيء خلاله. يُرمز للسماحية بالرمز ϵ، وهي تُعطَى عادة كنسبة من سماحية الهواء ϵ_0 على الصورة

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \qquad \text{(1.1)}$$

حيث: ϵ: سماحية العازل المطلقة.

ϵ_0: سماحية الهواء (أو الفراغ).

ϵ_r: السماحية النسبية للعازل.

تقاس السماحية بالفاراد/متر، وعلى ذلك فإن السماحية النسبية للهواء تساوي الوحدة، أما سماحية الهواء المطلقة ϵ_0 فهي تُعطَى بالقيمة:

$$\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8.854 \times 10^{-12} \qquad \text{farad/meter}$$

يعطي الجدول ١ ـ ١ قيماً نمطية للسماحية النسبية لأشهر مواد العزل المستعملة في مجالات الهندسة الكهربية بصفة عامة.

١.٣.٢ الشحنة الكهربية ـ الفيض الكهربي

الشحنة الكهربية Electric charge هي المصدر الأساسي للمجالات الكهربية وتنشأ على الجسم بسبب اكتسابه (أو فقده) الكترونات خلال ذراته. وإذا اكتسب الجسم الكترونات زائدة فإنه يصبح مشحوناً بشحنة سالبة، أما إذا فقدت ذرات الجسم بعضاً من الكتروناتها فإن الجسم يصبح مشحوناً بشحنة موجبة. يتم شحن الجسم عادة بإحدى الطرق الآتية:

١ ـ الاحتكاك.

٢ ـ الحث الكهروستاتيكي Electrostatic induction.

٣ ـ الشحن الكهربي.

٤ ـ بعض العمليات الكهروكيماوية.

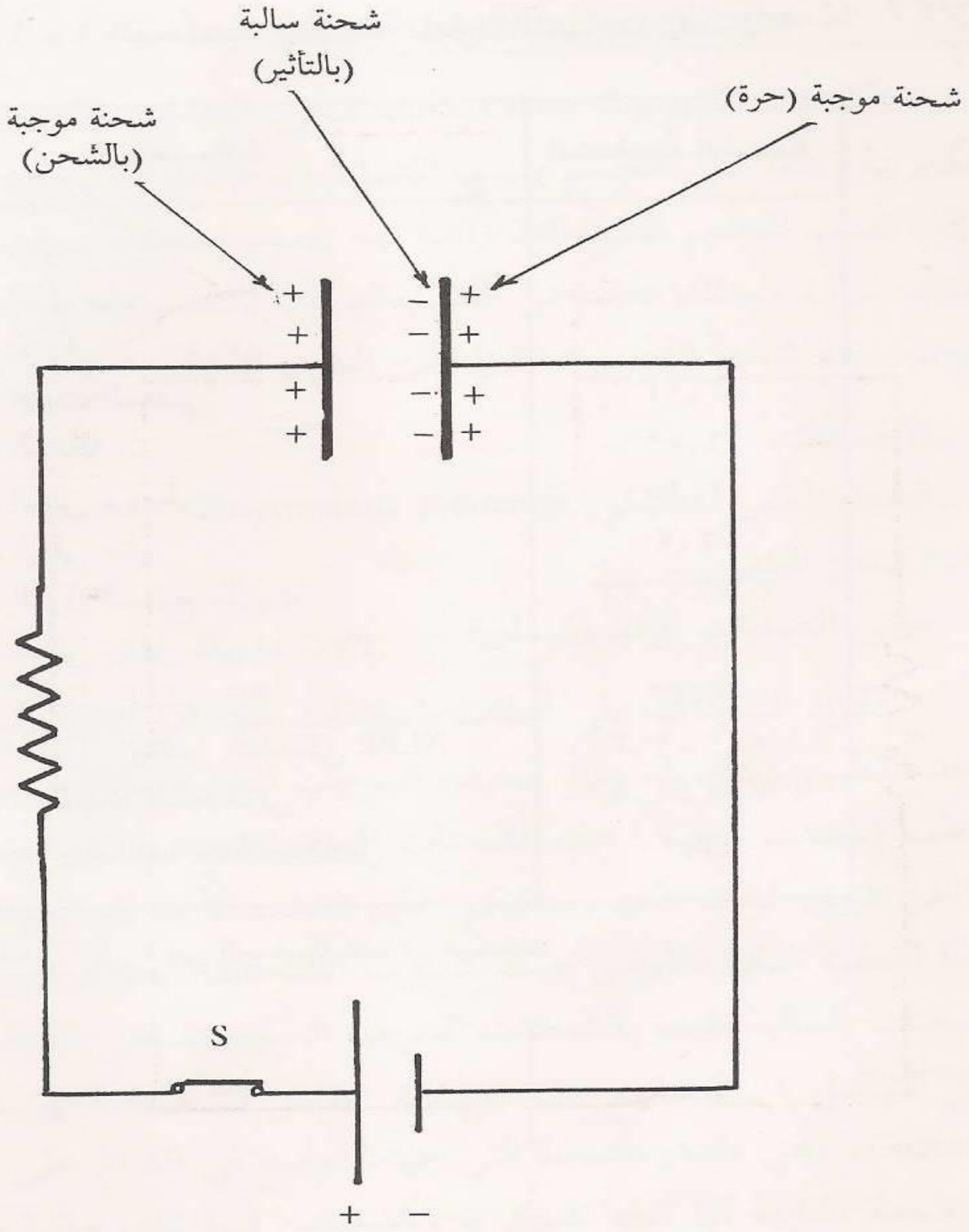
تتكون الشحنات على أقطاب المكثفات عادة عن طريق الشحن الكهربي لأحد القطبين (بتوصيله على الطرف الموجب لبطارية مثلاً) فيتكون على هذا القطب شحنات موجبة. هذه الشحنات الموجبة تجذب شحنات سالبة مساوية لها عن طريق الحث الكهروستاتيكي على القطب الآخر للمكثف. ويتم توصيل هذا القطب عادة بالأرض حيث تتسرب الشحنات الموجبة من عليه وتظل الشحنات السالبة مقيدة بالشحنات الموجبة الموجودة على القطب الموجب. يبين الشكل ١ ـ ٣ تتابع هذه العملية. تقاس الشحنة الكهربية بالكولوم Coulomb، وهي مقدار الشحنة التي حينما توضع في الفراغ على بعد متر واحد من شحنة مشابهة لها تماماً تتولد بين الشحنتين قوة تنافر مقدارها ٩ × ١٠^٩ نيوتون. ونلاحظ أن وحدة الكولوم هي وحدة أساسية مثل وحدات الزمن والمسافة والكتلة أي أنهاليست وحدة مستنتجة.

والمجال الكهربي هو المنطقة المحيطة بالجسم المشحون التي يظهر فيها تأثير هذه الشحنة. ويظهر هذا التأثير على شكل قوة تجاذب أو تنافر على أي شحنة كهربية توضع في هذا المجال. ويتم تحديد المجال الكهربي بفرض شكل تخطيطي يبين اتجاهات هذه القوى، ويسمى هذا الشكل بخطوط القوى Lines of force. واتجاه قوة المجال عند أي نقطة هو اتجاه المماس لخط القوة

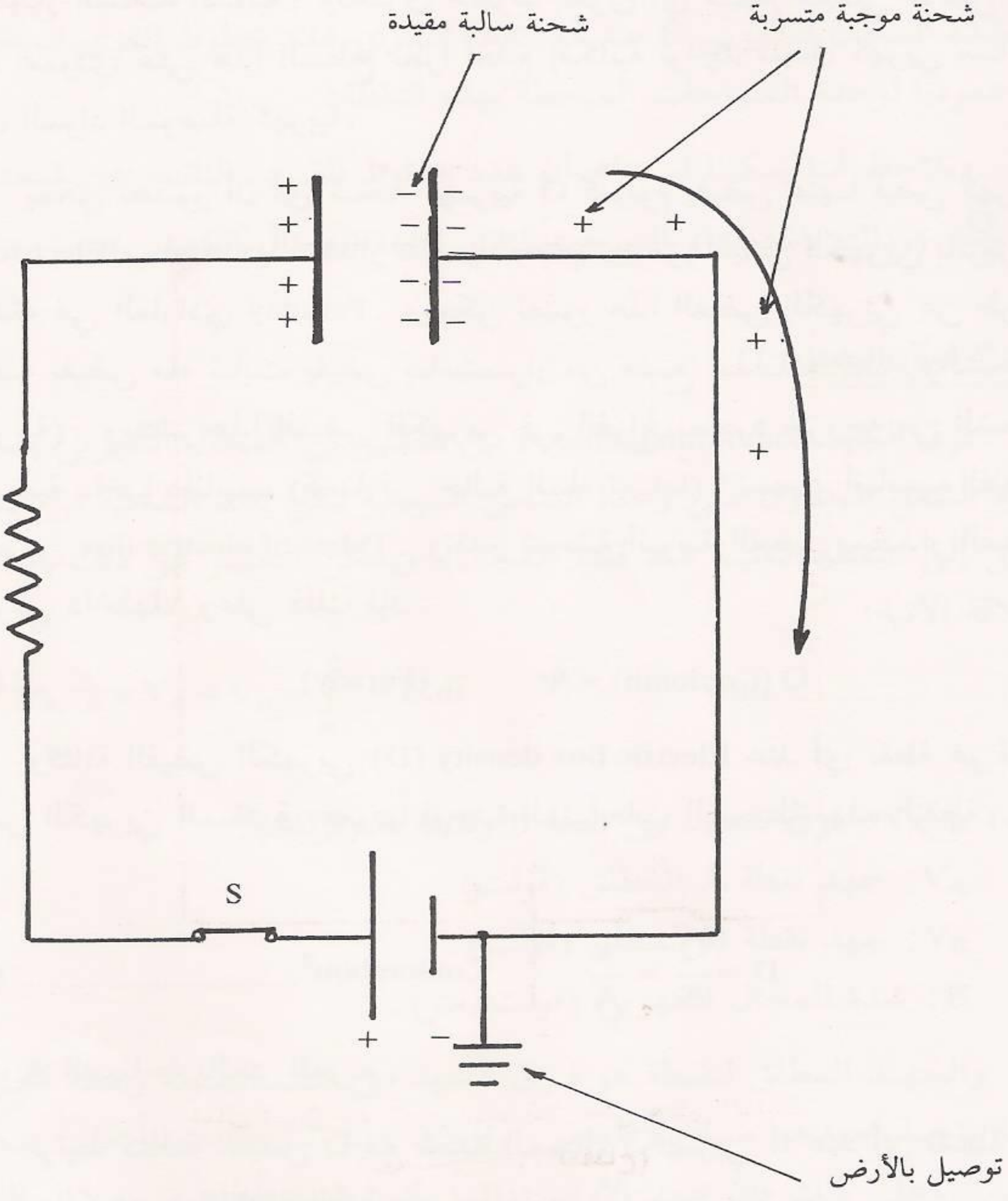
جدول ١ ـ ١ السماحية النسبية للمواد الكهربية العازلة(*)

المـــادة	السماحية النسبية
١ ـ الهواء	١,٠٠
٢ ـ السيراميك	٣٠٠٠
٣ ـ الزجاج	٧,٠٠
٤ ـ الزيت المعدني	٢,١٣
٥ ـ المايكا	٦,٥٠
٦ ـ البولي بروبيلين	٢,٢٥
٧ ـ البولي ستر	٢,٩
٨ ـ الورق المشبع بالزيت	٣,٨ ـ ٣,٣٣
٩ ـ البولي فينايل كلورايد PVC	٧ ـ ٥
١٠ ـ البولي إيثيلين PE	٢,٣٥
١١ ـ البولي إيثيلين التشابكي XLPE	٥,٢ ـ ٢,٣
١٢ ـ المطاط السيليكوني	٣,٥ ـ ٢,٩
١٣ ـ الورق المشبع بالأسكاريل	٦,٥

* المواد من ١ إلى ٨ هي المستعملة عادة في المكثفات



شكل ١ ـ ٣ ـ أ تكون الشحنات على لوحي المكثف
(لحظة توصيل المفتاح)



شكل ١ ـ ٣ ـ ب تسرب الشحنة الموجبة الحرة
(خلال الأرض أو البطارية)

عند هذه النقطة. كما أن خطوط القوى تنبع دائماً من الشحنة الموجبة وتدخل دائماً إلى الشحنة السالبة. وتخترق خطوط القوى أي سطح معدني موصل في اتجاه عمودي على هذا السطح نظراً لعدم إمكانية تواجد مجال كهربي ساكن خلال المواد الموصلة كهربياً.

يمكن تصور أن أي شحنة كهربية Q كولوم يفيض عنها فيض كهربي Electric flux مساوٍ عددياً لمقدار تلك الشحنة، ويرمز للفيض الكهربي بالرمز Ψ ووحدته هي الفارادي Faraday. ويمكن تصور هذا الفيض الكهربي عن طريق تشبيهه بفيض ماء ثابت يفيض باستمرار من منبع لذلك الماء (الشحنة الكهربية). وينتشر هذا الفيض الكهربي في الفراغ بمجرد خروجه من الشحنة الكهربية داخل أنابيب (كما في حالة الماء تماماً)، تسمى أنابيب الفيض الكهربي Tubes of electric flux. وتقدر شحنة أنبوبة الفيض بمقدار الفيض الكهربي داخلها. وعلى ذلك فإن:

$$Q\ (\text{Coulomb}) = \Psi \qquad (\text{Farady}) \qquad (1.2)$$

وكثافة الفيض الكهربي Electric flux density (D) عند أي نقطة هو قيمة الفيض الكهربي المخترق عمودياً لوحدة المساحات المحيطة بهذه النقطة، أي أن:

$$D = \frac{Q}{A} = \frac{\Psi}{A} \qquad \text{Coulomb/m}^2 \qquad (1.3)$$

حيث A المساحة بالمتر المربع.

ترتبط كثافة الفيض D مع شدة المجال الكهربي E عند أي نقطة في المجال الكهربي بالعلاقة الآتية:

$$\bar{D} = \epsilon\, \bar{E} \qquad (1.4)$$

حيث ϵ هي سماحية الوسط المطلقة عند هذه النقطة. ويتم تعريف شدة المجال الكهربي عادة بإحدى الطريقتين الآتيتين:

١ ـ شدة المجال الكهربي E عند أي نقطة تساوي مقدار القوة المؤثرة على

شحنة نقطية موجبة Positive point charge مقدارها كولوم واحد موضوعة عند تلك النقطة.

٢ ـ شدة المجال الكهربي E عند أي نقطة تساوي عدد خطوط القوى المخترقة عمودياً لوحدة المساحات الميحطة بهذه النقطة.

ونلاحظ أننا يمكننا استنتاج أن عدد خطوط القـوى الناتـج عن شحنة Q هو $\frac{Q}{\epsilon}$ (وذلك باستخدام التعريف الثاني لشدة المجال الكهربي).

١.٣.٣ فرق الجهد

فرق الجهد Potential difference بين نقطتين في المجال الكهربي يساوي عددياً الشغل المبذول على وحدة الشحن الموجبة لنقل تلك الشحنة من النقطة الأولى إلى النقطة الثانيـة ضد قـوة المجال. ويمكن التعبيـر عن ذلك ريـاضياً بالعلاقة الآتية:

$$V_{A-B} = V_A - V_B = \int_B^A -\bar{E}.d\bar{r} \qquad \text{volts.} \qquad (1.5)$$

حيث: V_{A-B}: فرق الجهد بين نقطة B ونقطة A (ڤولت).

V_A: جهد نقطة A المطلق (ڤولت)

V_B: جهد نقطة B المطلق (ڤولت).

$\bar{E}$: شدة المجال الكهربي (ڤولت/متر).

والجهـد المطلق لنقـطة هو فـرق الجهد بين تلك النقـطة ونقطة أخـرى قياسية يؤخـذ جهدهـا مساويـاً للصفر. وتؤخـذ هذه النقـطة عملياً على سـطح الأرض. وعلى ذلك فإن جهد الأرض دائماً يكون مساوياً للصفر بصرف النظر عن مقدار الشحنات الكهربية الداخلة أو الخارجة من الأرض. إن معنى هذا أن للأرض خاصية طبيعية أساسية وهي قدرتها على استقبال أو إرسال أي شحنـة كهربية دون أن يتغير جهدها عن الصفر. إن ذلك يرجـع إلى اعتبار أن الأرض جسم موصل لانهائي الحجم من الناحية العملية. تبعاً لما سبق فيمكن اعتبـار القاعدة الأساسية التالية:

«عند توصيل أي جسم موصل بالأرض فإن جهد هذا الجسم يكون حتماً مساوياً للصفر، إلا أن الشحنة الكهربية الموجودة على هذا الجسم لا تكون بالضرورة مساوية للصفر، وإنما تأخذ هذه الشحنة توزيعاً معيَّناً وقيمة معينة بحيث يتمشى هذا مع شرط انعدام جهد الجسم المؤرض».

إن هذه الخاصية قد دعت المهندسين إلى الاستفادة منها عن طريق تأريض الأجزاء المعدنية للأجهزة والآلات الكهربية التي تكون معرضة للمس بواسطة الإنسان وذلك لضمان جعل جهد هذه الأجزاء مساوياً للصفر وعدم تعرض من يلمسها للصدمات الكهربية. إن هذه العملية تعرف باسم التأريض الوقائي Protective Grounding.

٤.٣.١ سعة المكثف

سعة المكثف (C) Capacitance هي مقياس لقدرة المكثف على تخزين الشحنة على سطحيه عند فرق جهد معين بين هذين السطحين. ويمكن تبعاً لهذا كتابة العلاقة الآتية:

$$Q = CV \quad \text{.......} \quad (1.6)$$

حيث: Q: الشحنة على سطحي المكثف (كولوم).

V: فرق الجهد بين سطحي المكثف (ڤولت).

C: سعة المكثف (فاراد).

ووحدة السعة هي الفاراد وهو يساوي الشحنة اللازمة لتوليد فرق جهد مقداره ڤولت واحد بين سطحي المكثف، أي أن:

$$1\ \text{Farad} = 1\ \ \text{Coulomb/volt} \quad \text{.......} \quad (1.7)$$

والكولوم وحدة كبيرة من الناحية العملية، وكذلك الفاراد. وعلى ذلك فإن الوحدة العملية المستخدمة في قياس السعة هي الميكروفاراد حيث:

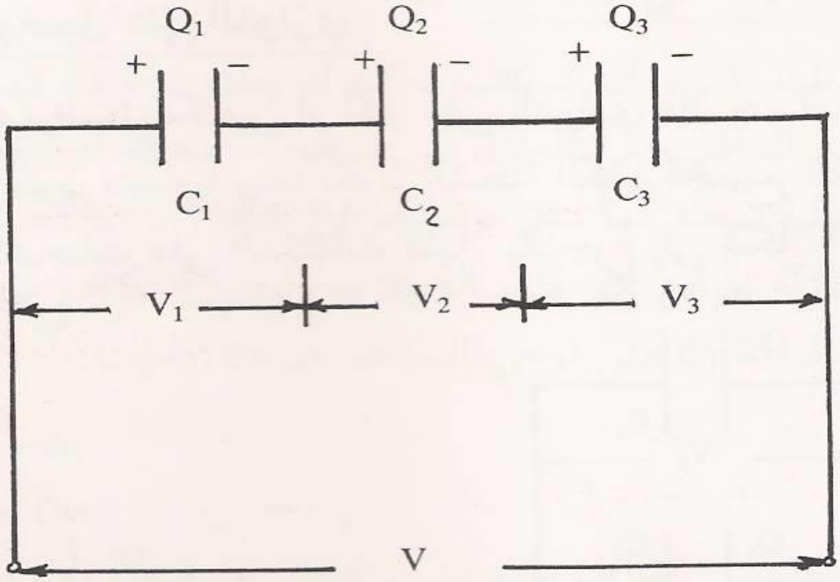
$$1\mu F = 1\ \text{micro farad} = 10^{-6} F \quad \text{.......} \quad (1.8)$$

٤.١ توصيل المكثفات

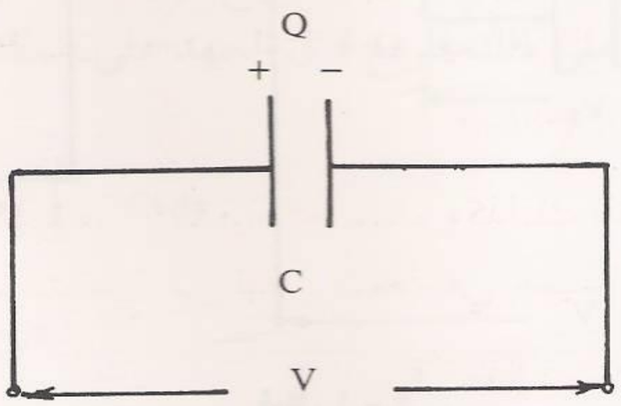
يمكن زيادة مقدار الشحنة المختزنة عن طريق تـوصيل مكثفين أو أكثـر على التوازي . ويمكن زيادة فرق الجهد بين طرفي دائرة معينة عن طريق توصيل مكثفين أو أكثر على التوالي ، وذلك على النحو التالي :

١.٤.١ التوصيل على التوالي

عنـد توصيـل مكثفين أو أكثر على التـوالي تتساوى الشحنـات الموجبـة والسالبة على جميع أسطح المكثفـات كما هـو مبين بالشكـل ١ ـ ٤ ، ويمكن بذلك كتابة العلاقات الآتية :



(أ)



(ب)

شكل ١ ـ ٤
أ ـ التوصيل على التوالي
ب ـ الدائرة المكافئة

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$$

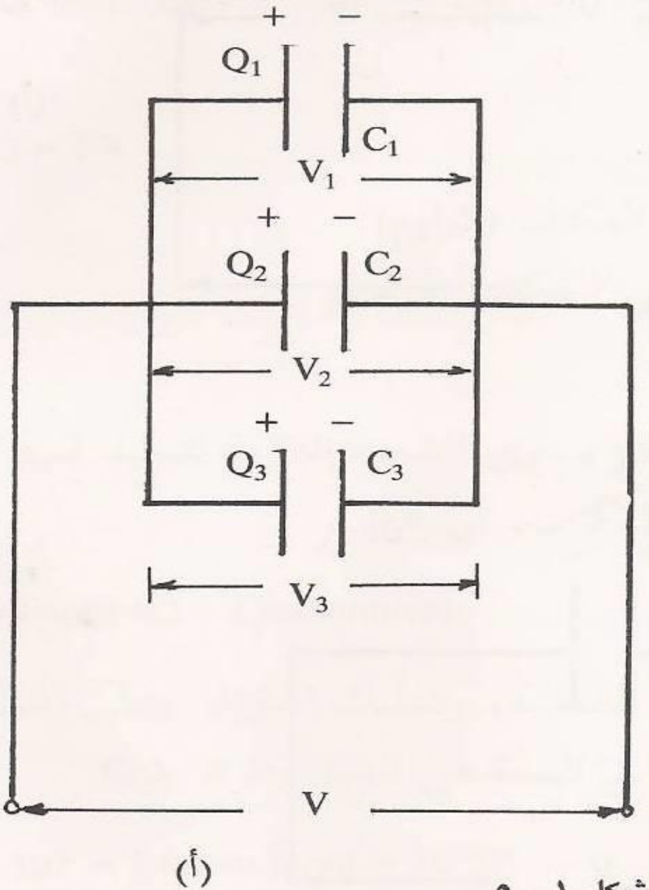
$$\therefore \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

حيث C هي السعة المكافئة للثلاثة مكثفات. ولعدد n من المكثفات الموصلة على التوالي فإن السعة المكافئة لها تعطى بالعلاقة.

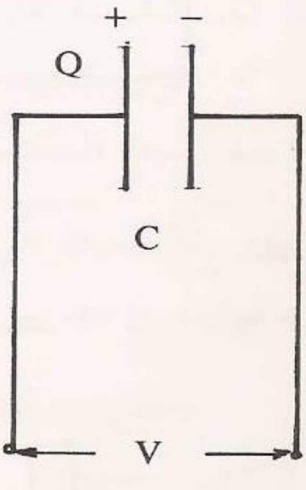
$$\frac{1}{C} \div \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i} \qquad \text{.......... (1.9)}$$

٢.٤.١ التوصيل على التوازي

عند توصيل مكثفين أو أكثر على التوازي فإن جهد الطرفين لجميع المكثفات يكون متساوياً بينما تكون الشحنة الكلية لجميع المكثفات مساوية لمجموع الشحنات على المكثفات كلها. بالرجوع إلى شكل ١ ـ ٥ يمكن كتابة العلاقات الآتية :



(أ)



(ب)

شكل ١ ـ ٥

أ ـ التوصيل على التوازي

ب ـ الدائرة المكافئة

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$V = V_1 = V_2 = V_3$$

$$\therefore CV = C_1V + C_2V + C_3V$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

حيث Q هي الشحنة على المكثف المكافىء للمكثفات الثلاثـة. ولعدد n من المكثفات الموصلة على التوازي فإن السعة المكافئة لها تعطى بالعلاقة:

$$C = \sum_{i=1}^{n} C_i \quad \text{.......} \quad (1.10)$$

٥.١ الطاقة المختزنة في المكثف

ذكرنا في البند ١ ـ ١ أن المكثف يمكنه أن يختـزن طاقـة كهربيـة داخل المجـال الكهربي النـاشيء في العازل بين سـطحيه. وهـذه الـطاقـة يكتسبهـا المكثف أثناء عملية شحنه كما سبق توضيحه في البند ١ ـ ٣. لحساب مقـدار هذه الطاقة المختزنة نفرض أن فرق الجهد بين لوحي المكثف هو v. الشغل المبذول لإضافة شحنة dq على لوحي المكثف هو dw، حيث:

$$dw = vdq$$

$$q = Cv$$

$$dq = Cdv$$

$$\therefore dw = Cvdv$$

حيث dw يعطي الشغل الخارجي المبذول لرفع فرق الجهد بين لوحي المكثف من v إلى (v + dv). وعلى ذلك فلرفع فرق الجهد على المكثف من الصفر إلى V فإن:

$$W = \int dw = \int_0^V Cvdv$$

$$\therefore W = \frac{1}{2} CV^2 \quad \text{.......} \quad (1.11)$$

يتبين من المعـادلة (1.11) أن سعـة المكثف تعطي مقيـاساً لقـدرة هـذا المكثف على اختزان الطاقة الكهربية داخله.

٦.١ المكثفات بأكثر من عازل

بالرجوع إلى المعادلتين (1.3) و (1.4) يمكن كتابة العلاقة الآتية:

$$E = \frac{Q}{\epsilon A} \quad (1.12)$$

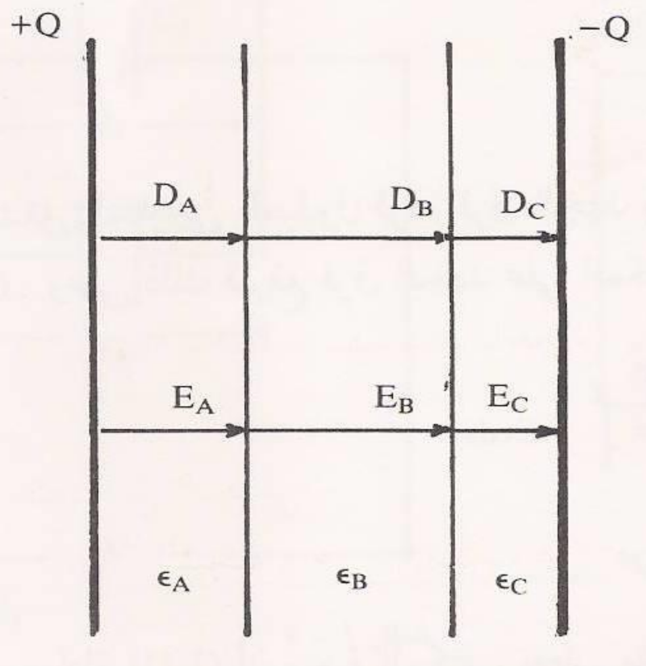
تسري المعادلة (1.12) في حالة مكثف متوازي السطحين Parallel-Plate Capacitor. يبين الشكل ١ ـ ٦ مكثفاً متوازي السطحين يتكون من ثلاثة عوازل مختلفة. يمكن تبعاً لذلك كتابة العلاقات الآتية:

$$D_A = D_B = D_C = \frac{Q}{A} \quad (1.13)$$

$$E_A = \frac{Q}{\epsilon_A A} \quad (1.14)$$

$$E_B = \frac{Q}{\epsilon_B A} \quad (1.15)$$

$$E_C = \frac{Q}{\epsilon_C A} \quad (1.16)$$



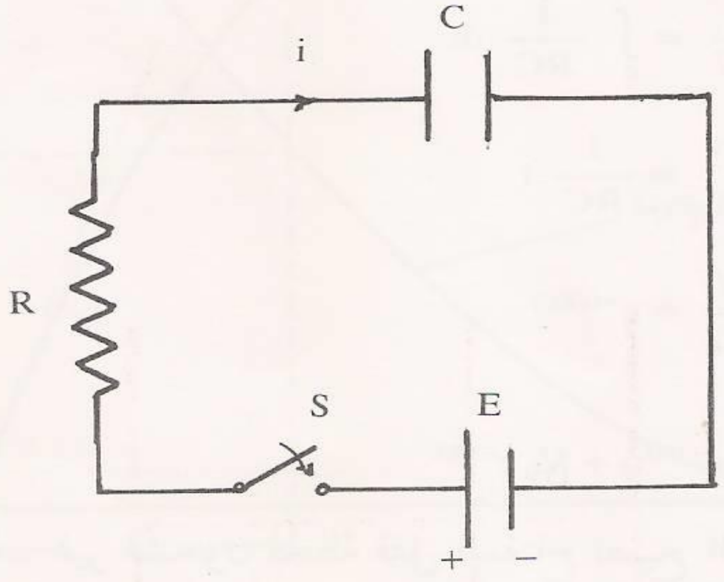
شكل ١ ـ ٦ مكثف متوازي السطحين بثلاثة عوازل

أي أن شدة المجال الكهربي داخل العازل تتناسب عكسياً مع سماحية هذا العازل. ويمكن اعتبار تلك القاعدة حقيقة عامة في جميع المكثفات. ويتم الاستفادة من هذه القاعدة في صناعات مكثفات الجهد العالي بصفة خاصة، حيث يمكن استخدام مواد عازلة بسماحية منخفضة وشدة كهربية عالية مع مواد عازلة بسماحية أكبر وشدة كهربية منخفضة نسبياً.

٧.١ شحن المكثف

يمكن شحن المكثف باستخدام دائرة كالمبينة بالشكل ١ ـ ٧. عند توصيل المفتاح (S) يمر المكثف بفترة عابرة transient period حتى تنتهي عملية الشحن. نفرض أنه كانت توجد شحنة q_0 على لوحي المكثف لحظة قفل المفتاح، أي أنه:

$$\text{At } t = 0 \quad , \quad q_0 = CV_0$$



شكل ١ ـ ٧ دائرة شحن مكثف ببطارية

حيث V_0 جهد المكثف قبل التوصيل.
عند أية لحظة تالية (t) فإن الشحنة q على المكثف هي:

$$q = CV$$

حيث V هو فرق الجهد بين لوحي المكثف عند هذه اللحظة.

التيار المار في الدائرة عند أية لحظة هو معدل زيادة الشحنة على المكثف بالنسبة للزمن، أي أن التيار i هو:

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(CV)$$

$$= C\frac{dV}{dt}$$

ومن معادلة الدائرة نجد أن:

$$E = iR + V$$

$$E = RC\frac{dV}{dt} + V$$

ثم نجري التكامل للمعادلة الأخيرة من لحظة قفل المفتاح (t = 0) إلى أية لحظة تابعة (t) كما يأتي:

$$\int_{V_0}^{V} \frac{dV}{E - V} = \int_0^t \frac{1}{RC}\, dt$$

$$-\left\{\ln(E - V)\right\}_{V_0}^{V} = \frac{1}{RC}\, t$$

$$\frac{E - V}{E - V_0} = e^{-(t/RC)}$$

ومنها ينتج أن:

$$V = E(1 - e^{-t/RC}) + V_0 e^{-t/RC} \qquad (1.17)$$

وإذا كان المكثف غير مشحون لحظة قفل المفتاح تصبح المعادلة (1.17) كما يأتي $(V_0 = 0)$:

$$V = E(1 - e^{-t/RC}) \qquad (1.18)$$

وللحصول على تيار الدائرة

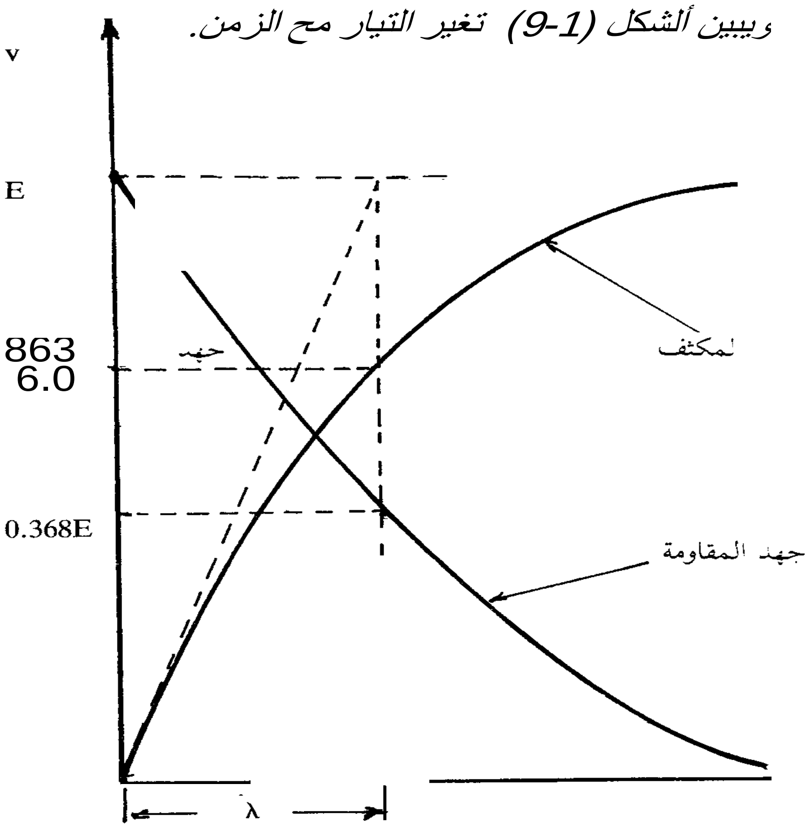
$$i = \frac{E - V}{R}$$

$$= \frac{1}{R}\left[E - E(1 - e^{-t/RC})\right]$$

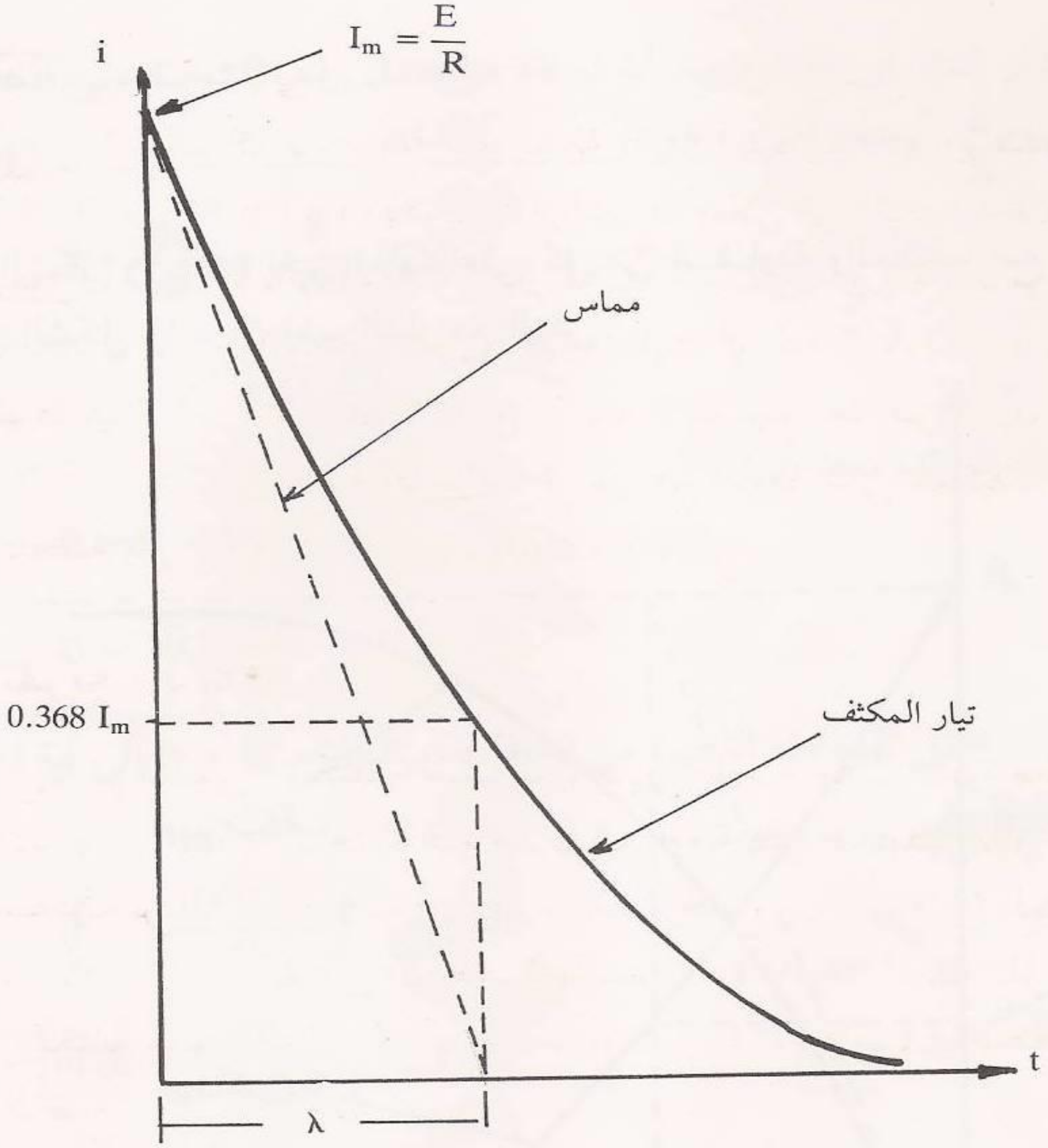
H

$$i = \frac{E}{R} e^{-t/RC} \ldots$$

.يبين ألشكل(1-8) تغيير ألجهد على كل من المقاومة
والمكثف مع الزمن
ويبين ألشكل (1-9) تغير التيار مح الزمن.



نكل ا _ 8نغبر جهدي الصكت والمفاومأ مع الن من



شكل ١ ـ ٩ تغير تيار الدائرة مع الزمن

الكميـة (RC) تُعرف بـاسم الثابت الـزمني Time constant للدائرة (λ)، وهي تعطي قيمة الـزمن الذي يصل عنده التيار إلى نسبة ($\frac{1}{e} = 0.368$) من قيمته الابتدائية، أي أن:

$$\text{At } t = RC = \lambda$$

$$i = I_{max}\, e^{-1}$$

$$i = 0.368\, I_{max}$$

وعند هذه اللحظة فإن قيمة الجهد على المكثف تصبح:

$$V_\lambda = E\,(1 - e^{-1})$$

$$= 0.632E$$

نلاحظ مما سبق ما يأتي :

١ ـ يعمل المكثف كدائرة مغلقة عند لحظة قفل الدائرة إذا كان غير مشحون من قبل $(at\ t = 0, V = 0)$ ويكون التيار أكبر ما يمكن في تلك اللحظة.

٢ ـ يعمل المكثف كدائرة مفتوحة للتيار الثابت المستقر، أي أنه بعد مرور الفترة العابرة لا يسمح المكثف بمرور التيار الثابت أي أنه $(at\ t = \infty, i = 0)$.

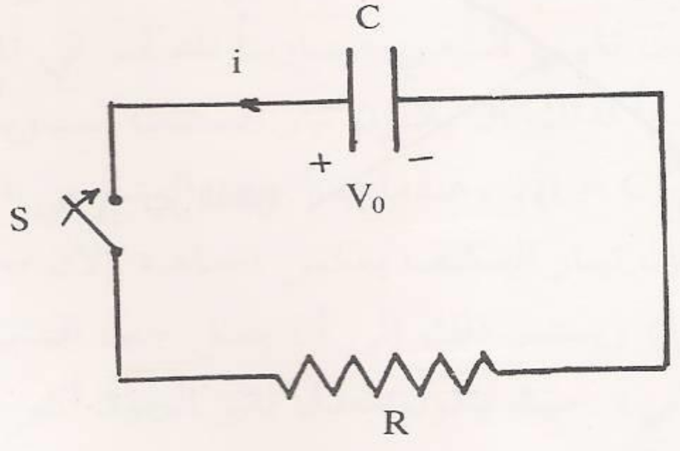
٣ ـ تهبط قيمة التيار إلى ٣٦,٨٪ من قيمته الابتدائية بعد مرور زمن يساوي الثابت الزمني من لحظة قفل الدائرة. ويرتفع الجهد على المكثف عند هذه اللحظة إلى ٦٣,٢٪ من قيمته النهائية العظمى.

٨.١ تفريغ المكثف

إذا تم توصيل المكثف المشحون على مقاومة خلال دائرة مغلقة فإن المكثف يفرغ الطاقة المختزنة فيه خلال المقاومة التي تستهلك بدورها تلك الطاقة وتحولها إلى طاقة حرارية. بالرجوع إلى الدائرة الموضحة بالشكل (١ ـ ١٠)، وبفرض أن جهد المكثف كان (V_0) عند لحظة قفل المفتاح (S)، وبكتابة معادلة الدائرة كما سبق نحصل على ما يأتي عند أية لحظة t بعد قفل المفتاح:

$$i = \frac{dq}{dt} = C\ \frac{dV}{dt}$$

$$iR + V = 0$$



شكل ١ ـ ١٠ دائرة تفريغ المكثف

$$RC\frac{dV}{dt} + V = 0$$

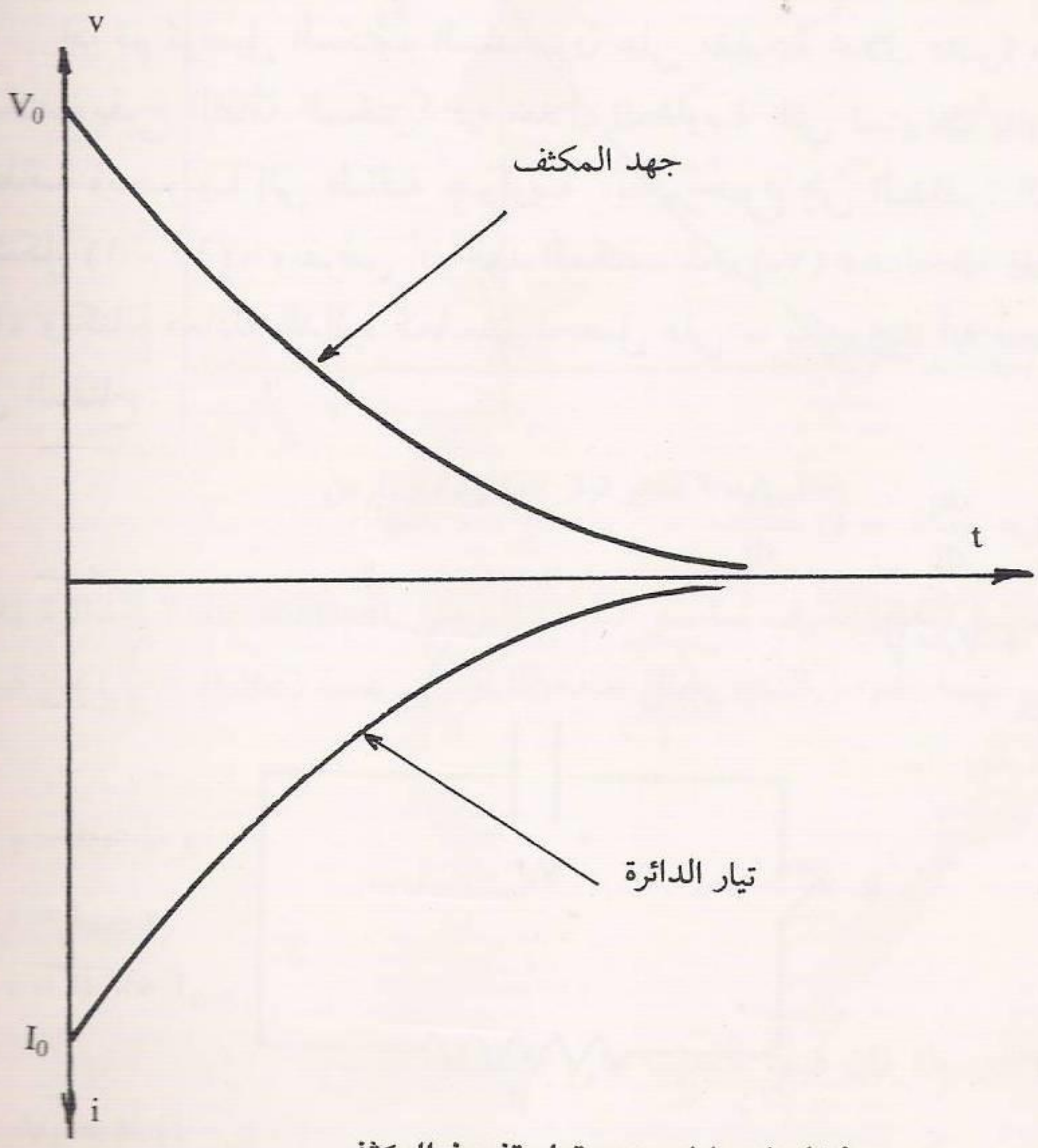
$$\int_{V_0}^{V} \frac{dV}{V} = - \int_{0}^{t} \frac{1}{RC}\, dt$$

$$\ln \frac{V}{V0} = - \frac{t}{RC}$$

$$V = V_0\, e^{-t/RC} = V_0 e^{-t/\lambda} \quad \text{..........} (1.20)$$

$$i = \frac{V}{R}\, e^{-t/\lambda} \quad \text{..........} (1.21)$$

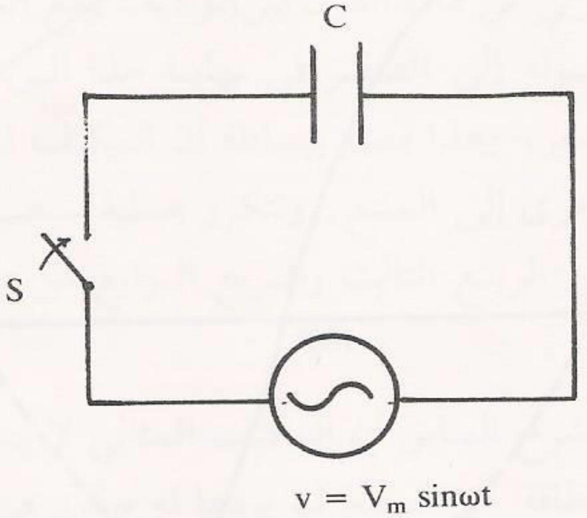
يبين الشكل ١ ـ ١١ تغير جهد المكثف وتيار الدائرة مع الزمن.



شكل ١ ـ ١١ جهد وتيار تفريغ المكثف

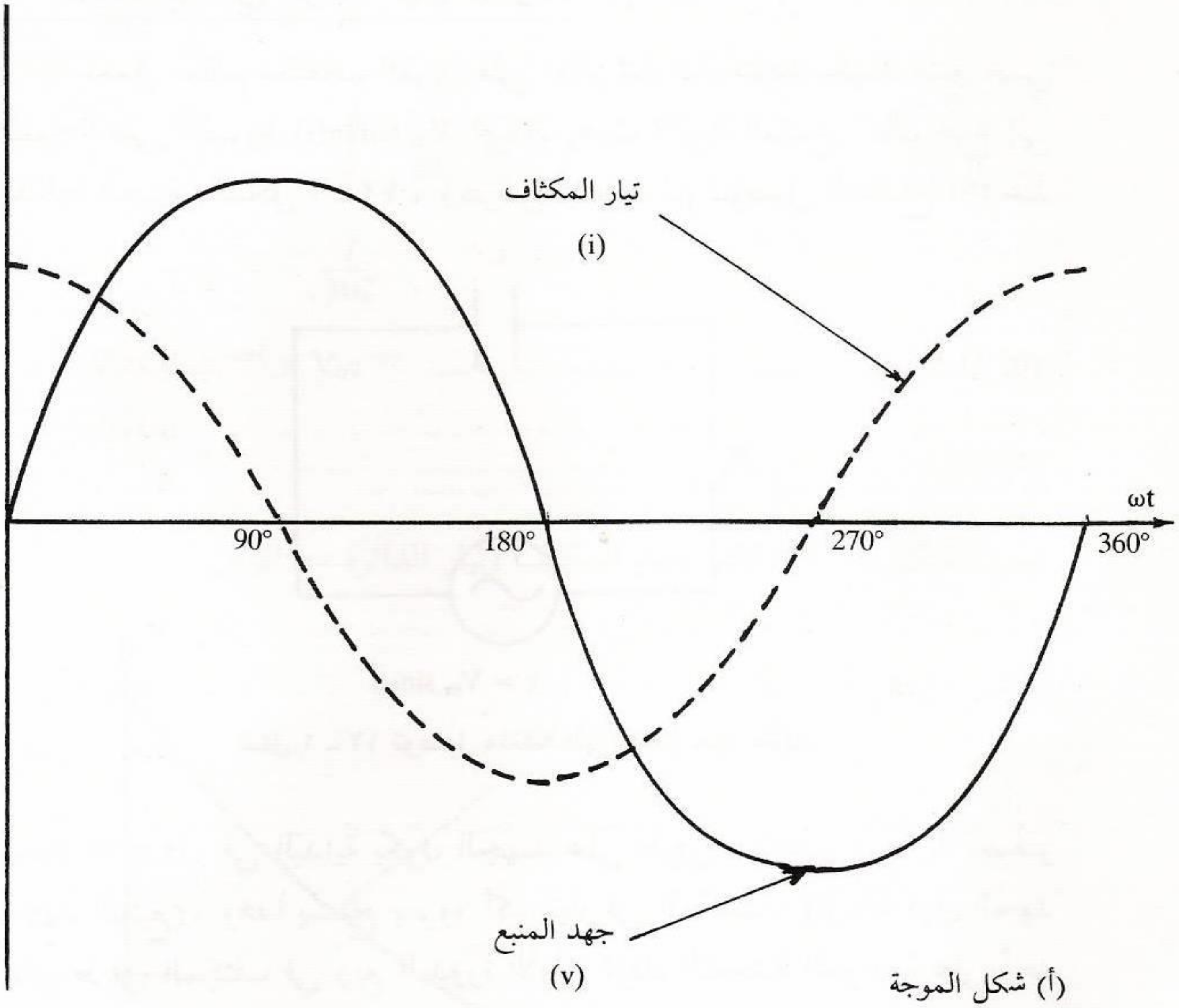
٩.١ المكثفات في دوائر التيار المتردد

تعمل معظم مكثفات القوى على دوائر تيار تيار متردد بجهد منبع جيبي الموجة على الصورة ($v = V_m \sin 2\pi ft$)، حيث f تردد المنبع. بالرجوع إلى الدائرة المبينة بالشكل ١ ـ ١٢، وبفرض أنه قد تم توصيل المفتاح (S) عند

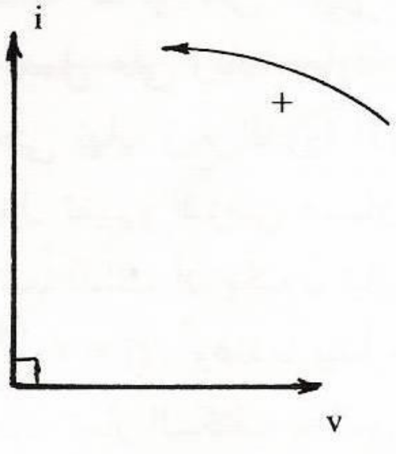


شكل ١ ـ ١٢ توصيل مكثف على مصدر جهد متردد

لحظة ($t = 0$). في البداية يكون الجهد على طرفي المكثف مساوياً للصفر (جهد المنبع)، وهذا يسمح بمرور أكبر تيار في المكثف. وبزيادة فرق الجهد على طرفي المكثف في ربع الدورة الأولى تزداد الشحنة الموجبة على أحد اللوحين وكذلك الشحنة السالبة على اللوح الآخر، حيث يزداد فرق الجهد على طرفي المكثف مما يعمل على زيادة معاوقة المكثف لمرور التيار من خلاله. تستمر هذه الحالة حتى نهاية ربع الدورة الأولى حيث يصل الجهد إلى أقصى قيمة له ويكون معدل تغيره الزمني مساوياً للصفر في تلك اللحظة عند ($2\pi ft = \frac{\pi}{2}$). ينتج تبعاً لذلك أن يكون تيار المكثف مساوياً للصفر في تلك اللحظة (لاحظ أن $i = C\frac{dv}{dt}$). وعندما يبدأ جهد المنبع في التناقص مع بداية ربع الدورة الثاني فإن تيار المكثف يعكس اتجاهه (لأن معدل زيادة الجهد سالب في تلك الفترة) ويستمر ذلك إلى أن يصل جهد المنبع إلى الصفر في نهاية ربع الدورة الثاني، حيث يكون معدل تغير الجهد أكبر ما يمكن وكذلك قيمة التيار تكون عند أقصى قيمة لها. وتتكرر هذه العملية في الربعين الثالث والرابع كما هو موضح بالشكل ١ ـ ١٣.



(أ) شكل الموجة



(ب) تمثيل المتجهات

شكل ١ ـ ١٣ جهد وتيار المكثف

نلاحظ من الشرح السابق أنه عند لحظة انتهاء ربع الدورة الأول يكون المكثف قد اكتسب أقصى جهد له (V_m). ينتج عن ذلك أن يكون هذا المكثف قد اكتسب طاقة من المنبع مقدرها ($\frac{1}{2}CV_m^2$) وذلك تبعاً للمعادلة (11 - 1). وتجدر الإشارة هنا إلى أن تلك الطاقة لم تتبدد وإنما هي طاقة اختزنها المكثف داخل المجال الكهربي في مادة العزل بين لوحيه. ومع انخفاض الجهد في ربع الدورة الثاني ووصوله إلى الصفر في نهاية هذا الربع يصبح الجهد على المكثف مساوياً للصفر، وهذا معناه ببساطة أن المكثف قد فقد الطاقة المختزنة داخله وأعادها مرة خرى إلى المنبع. وتتكرر عملية سحب الطاقة وإرجاعها بين المكثف والمنبع في الربع الثالث والربع الرابع من دورة الموجة الجيبية للجهد.

نستنتج من الشرح السابق أن المكثف المثالي لا يستهلك طاقة من المنبع وإنما يختزن هذه الطاقة من المنبع ثم يردها له مرتين في كل دورة من دورات موجة الجهد.

يمكننا الآن بيان الشرح السابق باستخدام المعادلات الخاصة بالدوائر وذلك على النحو الآتي:

جهد المنبع:

$$v = V_m \sin \omega t \qquad (\omega = 2\pi f)$$

تيار الدائرة

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

$$= V_m \omega C \cos \omega t$$

أي أن

$$i = I_m \cos \omega t$$

$$= I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

حيث

$$I_m = V_m \omega C \quad \text{.......} \quad (1.22)$$

$$I_m = \frac{V_m}{(1/\omega C)} = \frac{V_m}{X_c} \quad \text{.......} (1.23)$$

حيث X_c هي المفاعلة السعوية capacitive reactance للمكثف.

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad \text{Ohms.} \quad \text{.......} (1.24)$$

وباستخدام المؤثر ($j = 1\angle 90°$) المعروف في دوائر التيار المتردد فإننا نحصل على ما يأتي:

$$i = j\omega C v$$

$$= j \frac{v}{X_c} = \frac{v}{-jX_c} \quad \text{.......} (1.25)$$

أي أن تيار المكثف يسبق leads الجهد الواقع عليه بزاوية طور، phase angle مقدارها ٩٠°. ويتم تمثيل ذلك اتجاهياً كما هو موضح بالشكل ١ ـ١٣.

القيمة اللحظية للقدرة p تُعطى من العلاقة.

$$p = vi = V_m.I_m (\sin\omega t).(\cos \omega t)$$

وبتكامل المعادلة السابقة على مدى دورة كاملة للحصول على الطاقة (W) المسحوبة من المنبع بواسطة المكثف نجد أن:

$$W = \int_0^{2\pi/\omega} p.dt$$

$$= \int_0^{2\pi/\omega} V_m.I_m.(\sin \omega t).(\cos \omega t).dt$$

$$= 0$$

أي أن معدل استهلاك المكثف للطاقة يساوي الصفر على مدى دورة كاملة، وهو ما تبين لنا من الشرح السابق.

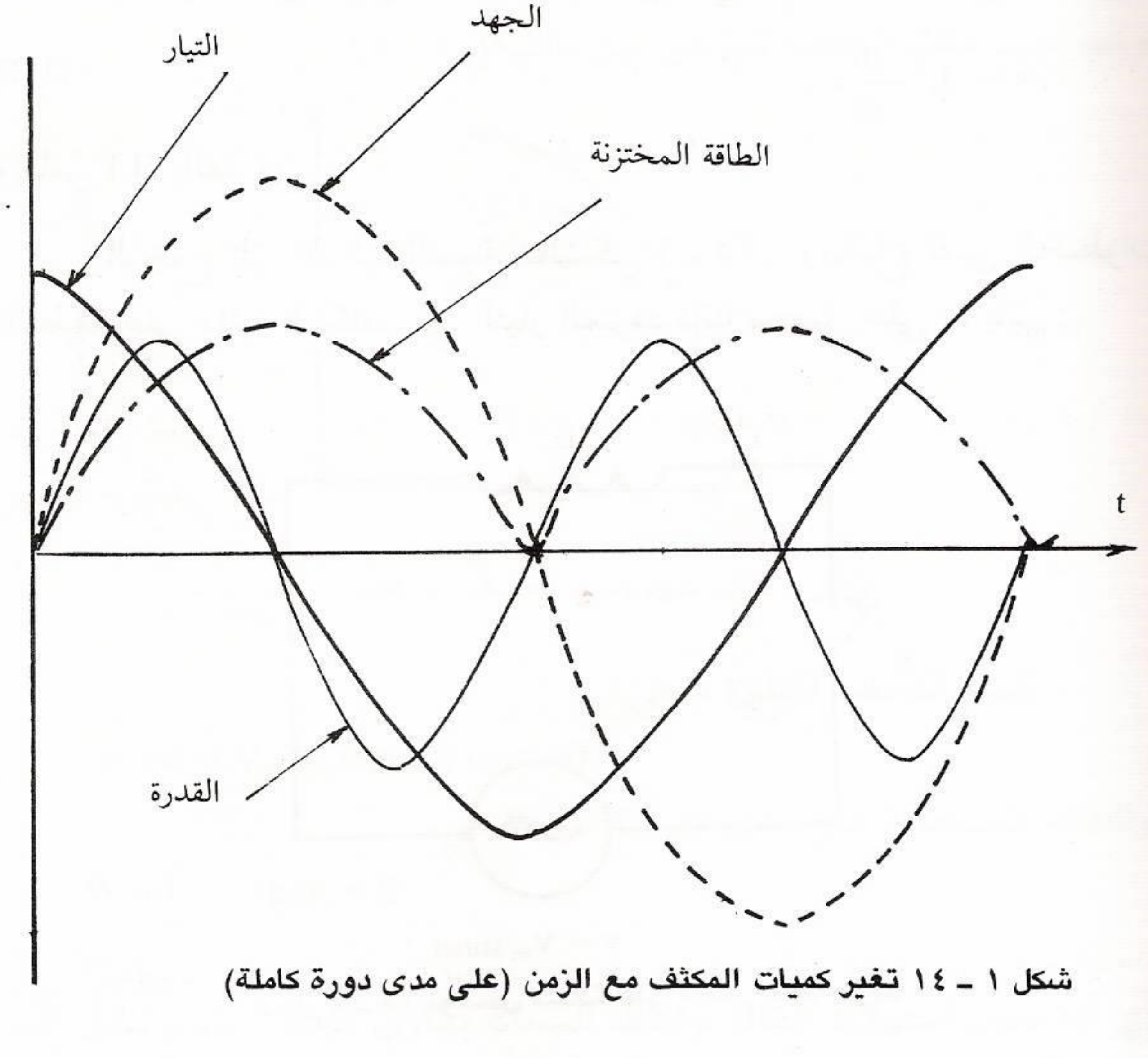
تجدر الإشارة هنا إلى القيمة اللحظية للقدرة في المكثف تصل إلى

أقصى ما يمكن. وهذه القيمة القصوى تحدث عند اللحظة $(\sin 2\omega t = 1)$، وعندها.

$$p_{max} = \frac{V_m . I_m}{2}$$

$$= V.I \qquad (1.26)$$

حيث (I) هي القيمة الفعالة للتيار و(V) هي القيمة الفعالة للجهد. يبين الشكل ١ ـ ١٤ تغير كل من القيمة اللحظية للقدرة والطاقة المختزنة داخل المكثف على مدى دورة كاملة.



شكل ١ ـ ١٤ تغير كميات المكثف مع الزمن (على مدى دورة كاملة)

١٠.١ المفاعلة الحثية

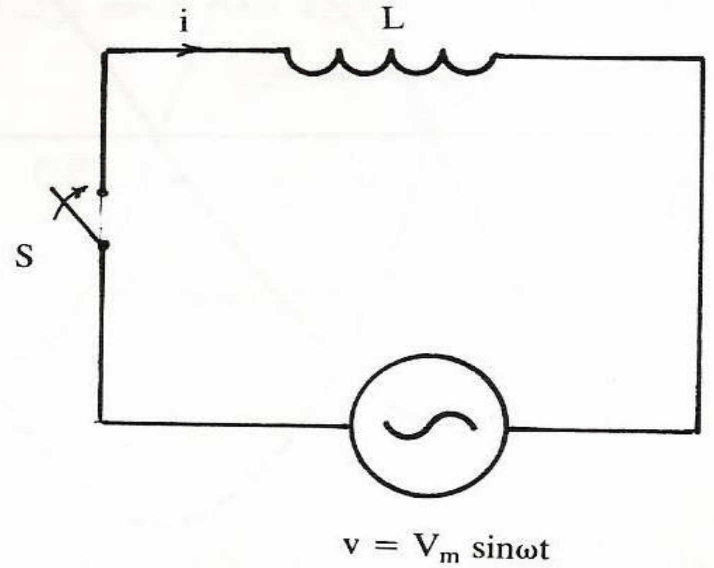
نـظراً لأهمية تـأثير المفـاعلات الحثيـة inductive reactances على عمل المكثف فإننا سنورد في هذا البند ملخصاً لتصرف المفاعلات الحثية في الدوائر الكهربية، دون الخوض في التفاصيل. ويمكن الرجوع لمزيد من التفصيل إلى كتب الدوائر الكهربية.

تنشـأ المفاعلة الحثيـة في الدوائـر الكهربيـة عادة نتيجـة لتواجـد مجال مغناطيسي مرتبط بتيار كهربي. ومحاثة inductance الدائرة (L) هي النسبـة بين الفيض المغناطيسي (Φ) والتيار المسبب لهذا الفيض (i). وعند مرور تيار (i) في محاثة فإنه يتولد على طرفي تلك المحاثة فرق في الجهد (v) يعطى بالعلاقة:

$$v = L \frac{di}{dt} \qquad (1.27)$$

وتقاس (L) بالهنري.

بالرجوع إلى الدائرة المبينة بـالشكل ١ ـ ١٥، وبـاتباع نفس الخـطوات المطبقة على دائرة المكثف في التيار المتردد فإننا نحصل على ما يأتي:



شكل ١ ـ ١٥ توصيل محاثة على مصدر جهد متردد

$$v = V_m \sin\omega t$$

$$i = \frac{V_m}{\omega L} \quad \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

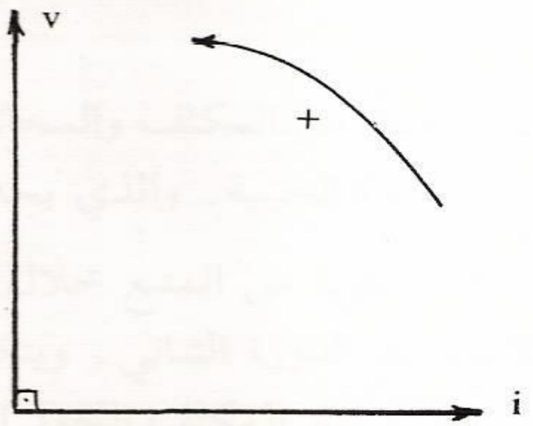
$$i = I_m \quad \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$I_m = \frac{V_m}{\omega L} = \frac{V_m}{X_L} \quad \text{.......... (1.28)}$$

حيث (X_L) هي المفاعلة الحثية inductive reactance . ومنها ينتج :

$$i = \frac{v}{jX_L} \quad \text{.......... (1.29)}$$

أي أن تيار المحاثة يتأخر lags عن الجهد بين طرفيها بزاوية طور مقدارها ٩٠°، ويتم تمثيل ذلك اتجاهياً كما هو مبين بالشكل ١ ـ ١٦ .



شكل ١ ـ ١٦ جهد وتيار المحاثة اتجاهياً

القيمة اللحظية للقدرة p هي :

$$p = vi = V_m . I_m (\sin \omega t) (\cos \omega t).$$

والطاقة المسحوبة على مدى دورة كاملة W هي :

$$W = \int_0^{2\pi/\omega} p.dt = 0$$

أي أن معدل استهلاك الطاقة بواسطة المحاثة يساوي الصفر. ويتم تبادل الطاقة بين المحاثة والمصدر مرتين في كل دورة كما هي الحال في حالة المكثف . وأقصى قيمة للطاقة المختزنة هي :

$$W_{max} = \frac{1}{2} LI_m^2 \quad (1.30)$$

وأقصى قيمة للقدرة اللحظية للمحاثة هي :

$$p_{max} = V.I \quad (1.31)$$

الباب الثاني

القدرة ومعامل القدرة

Power and Power Factor

١.٢ مقدمة

رأينا في الباب الأول أن كـلاً من المكثف والمحاثـة لا تستهلكان طـاقة كهربية من مصدر الطاقة ذي الموجة الجيبية. والذي يحدث فعلاً هو ما يأتي:

أ - يختزن المكثف الطاقة المسحوبة من المنبع خلال ربع الـدورة الأول ثم يردها ثانية للمنبع خلال ربـع الدورة الثـاني. ويتكرر ذلـك خلال ربعي الدورة الثالث والرابع. ويسبق تيار المكثف الجهد الواقع بين طرفيه بزاوية طور مقدارها ٩٠°.

ب - تختزن المحاثة الطاقة المسحوبة من المنبع خلال ربع الـدورة الأول ثم تردها ثانية للمنبع خلال ربـع الدورة الثـاني. ويتكرر ذلـك خلال ربعي الدورة الثالث والرابع. ويتأخر تيار المحاثة عن الجهد الواقع بين طرفيها بزاوية طور مقدارها ٩٠°.

جـ - رغم أن متوسط الطاقة المسحوبة من المنبع يساوي الصفر لحالتي المكثف والمحاثة، إلا أن القدرة لها دائماً قيمة لحظية وتصل إلى أقصى قيمة لها (V.I) عند نهاية كل ربع من أرباع الدورة.

إن هذه القدرة التي لا تتحول إلى طاقة كهربية بمرور الوقت تعني ببساطة

أنها قدرة غير مفيدة وتسمى قدرة غير فعالة أو قدرة مردودة reactive power. ونلاحظ أنها مقترنة بالتيار الذي يسبق الجهد أو يتأخر عنه بمقدار ٩٠°.

وعلى العكس مما سبق، فإن التيار عندما يكون في نفس طور الجهد in-phase، أي أن الزاوية بين التيار والجهد تساوي الصفر، فإن القدرة اللحظية تتحول إلى طاقة يتم سحبها من مصدر التغذية ولا تعود إليه مرة أخرى وإنما تخرج من الدائرة على صورة أخرى من صور الطاقة (طاقة حرارية أو ضوئية أو ميكانيكية مثلاً). ولعل أبسط حالة معروفة لنا هي حالة مرور تيار في مقاومة خالصة حيث نحصل بتطبيق قانون أوم على ما يأتي.

$$v = iR \quad (2.1)$$

حيث: i: القيمة اللحظية للتيار خلال المقاومة (أمبير).

v: القيمة اللحظية للجهد على طرفي المقاومة (ڤولت).

R: قيمة المقاومة بالأوم.

وعلى ذلك فإن:

$$V_m \sin\omega t = RI_m \sin\omega t \quad (2.2)$$

أي أن:

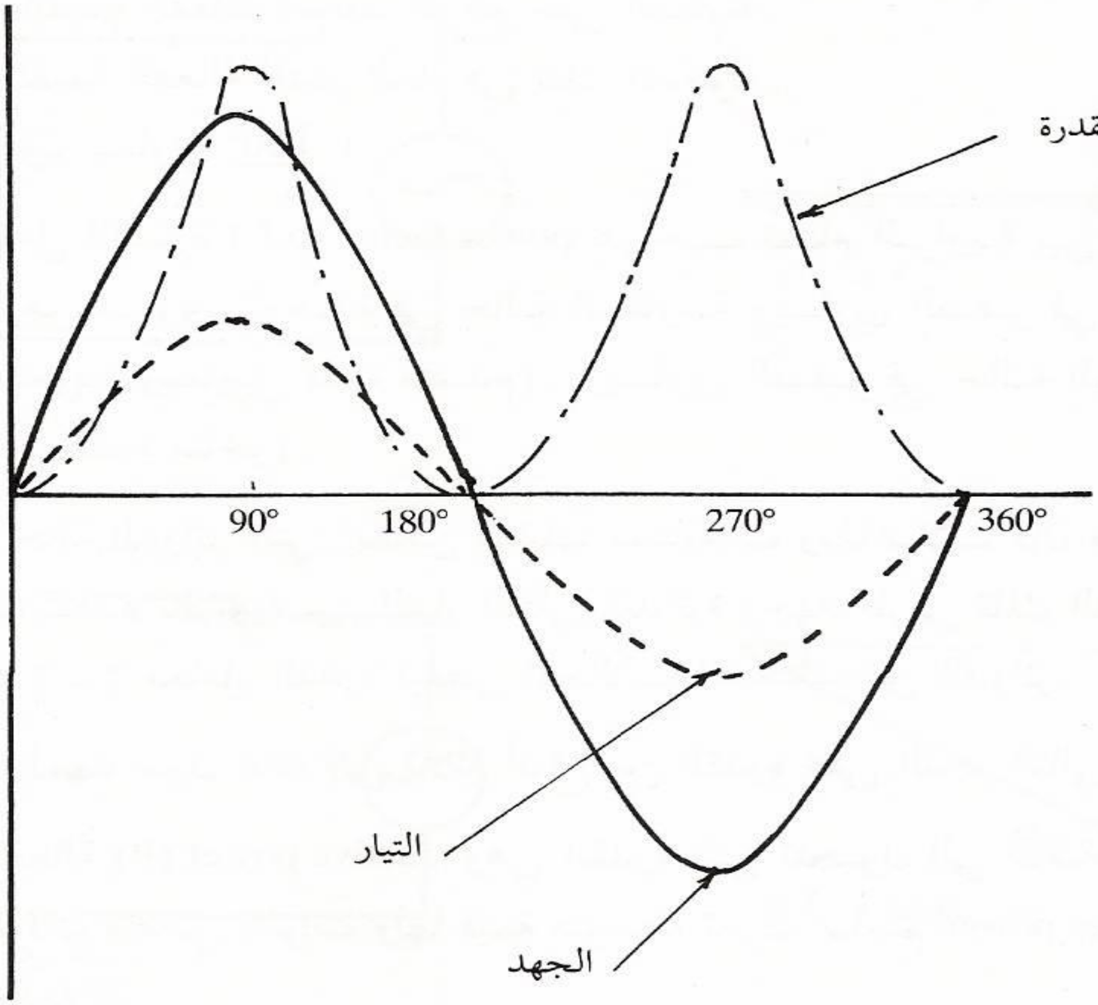
$$I = \frac{V}{R} \quad (2.3)$$

يبين الشكل ٢ ـ ١ هذه الفكرة.

إن القدرة التي تتحول إلى طاقة مفيدة يمكن سحبها من الدائرة تعرف باسم القدرة الفعالة active power، ويمكن الحصول عليها إذا كان تيار الدائرة في نفس طور الجهد بين طرفيها.

٢.٢ معامل القدرة

تتكون الدوائر الكهربية عادة من مكونات Components من المقاومات والمكثفات والمحاثات. كما يمكن في معظم الحالات تمثيل أي جهاز كهربي أو منظومة كهربية بالدائرة المكافئة لها والتي تتكون من تلك المكونات. وعند وجود تلك المكونات في دائرة واحدة فإن كلاً منها يتصرف في الدائرة مستقلاً



شكل ٢ ـ ١ الجهد والتيار والقدرة في حمل مقاومة خالصة

عنْ باقي مكونات الدائرة وذلك بخصوص العلاقة التي تربط التيار المار والجهد بين طرفي تلك المكوِّنة وذلك على النحو التالي :

أ ـ بالنسبة لمقاومة R

$$V = IR \quad (2.4)$$

ب ـ بالنسبة لمفاعلة سعوية X_C

$$V = -jIX_C \quad (2.5)$$

جـ ـ بالنسبة لمفاعلة حثية X_L

$$V = jIX_L \quad (2.6)$$

حيث: V : القيمة الفعالة للجهد الواقع على المكونة.

I : القيمة الفعالة للتيار المار في تلك المكونة.

j : مؤثر يساوي $1 \angle 90^\circ$.

ومعامل القدرة power factor (p.f.) هو جيب تمام الزاوية بين التيار والجهد. وهو يساوي الوحدة في حالة المقاومة ويساوي الصفر في حالة المفاعلة السعوية (معامل قدرة متقدم)، ويساوي الصفر في حالة المفاعلة الحثية (معامل قدرة متأخر).

وفي حالة الدوائر التي يمكن تمثيلها بمقاومات ومفاعلات فإن معامل قدرة الدائرة يتحدد بالزاوية بين التيار الكلي للدائرة وجهد طرفي تلك الدائرة. يبين الشكل ٢ ـ ٢ معامل القدرة لبعض الحالات المختلفة من الدوائر.

يشير المهندسون عادة إلى ثلاثة أنواع من القدرة على النحو التالي:

i - القدرة الفعالة active powet (P)، وهي القدرة التي تتحول إلى طاقة مفيدة بمرور الوقت وتقاس بالوات ولها قيمة متوسطة تعرف باسم average power وتعطى بالعلاقة.

$$P = V.I.\cos\phi \quad \text{watt} \qquad (2.7)$$

حيث: $\cos\phi$: معامل القدرة.

P : القيمة المتوسطة للقدرة.

ويمكن الحصول على الطاقة المسحوبة (W) خلال زمن t من العلاقة

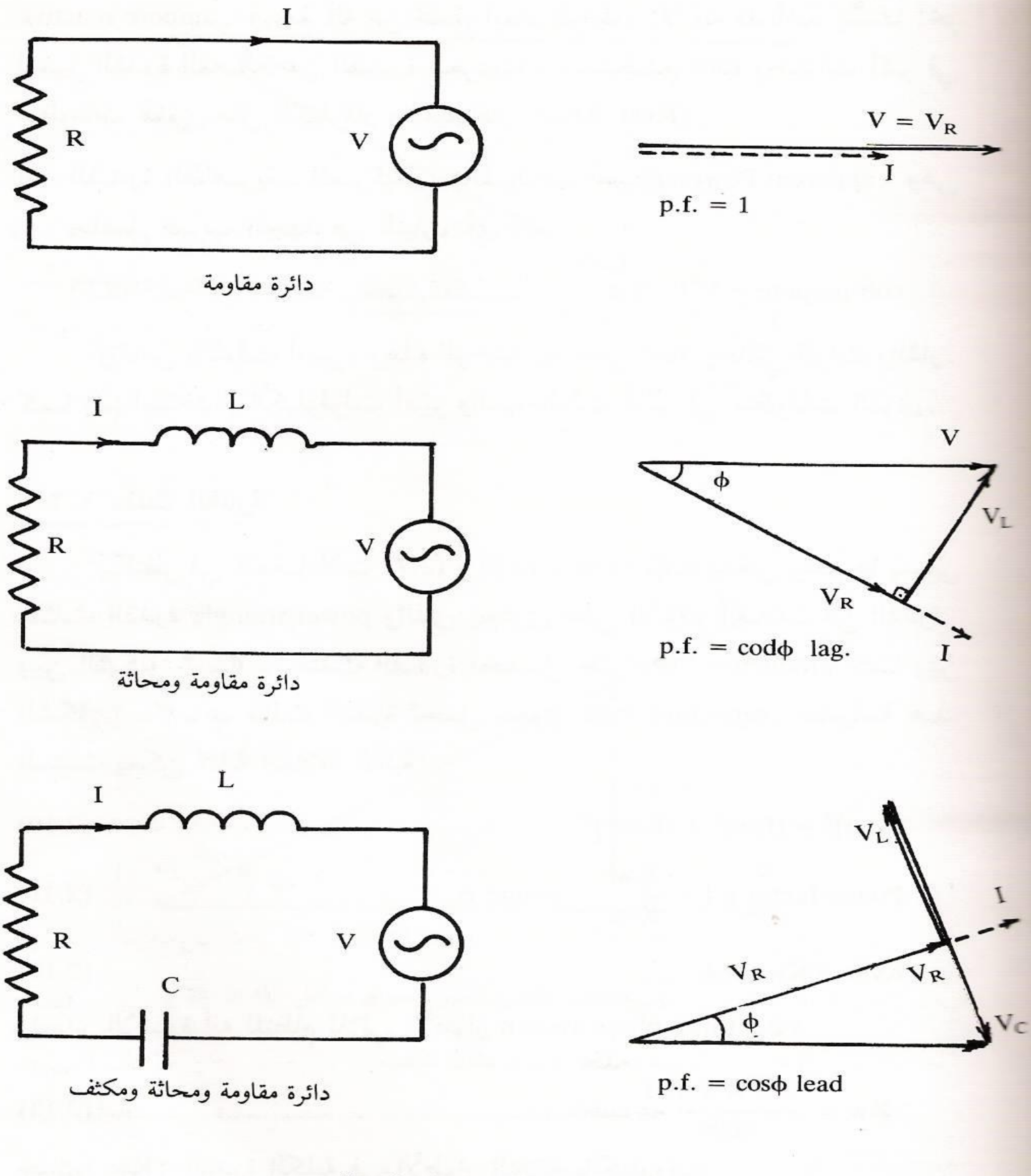
$$W = P.t \qquad (2.8)$$

حيث t بالثانية وW بالجول (وات. ثانية). ويستخدم مهندسو القوى الكيلووات والميجاوات في قياس القدرة، كما يستخدمون الساعة أحياناً كوحدة للزمن.

ii - القدرة غير الفعالة (المردودة) reactive power (Q)، وهي القدرة التي لا تتحول إلى طاقة بمرور الزمن، إلا أن لها قيمة عظمى تعطى بالعلاقة:

$$Q = V.I.\sin\phi \quad \text{var.} \qquad (2.8)$$

وتقاس هذه القدرة بالڤولت ـ أمبير المردود (var) ويعرف باسم -Volt



شكل ٢ ـ ٢ معامل القدرة في الدوائر

ampere reactive. ورغم أنه من نفس أبعاد الوات، إلا أنه قد أخذ إسماً آخر لتمييز القدرة الفعالة عن القدرة المردودة. وتُستخدم عادة وحدات أكبر في منظومات القوى مثل الكيلوڤار والميجاڤار (Kvar, Mvar).

iii - القدرة الظاهرية ـ المركبة ـ (الڤولت ـ أمبير) apparent Power، وهي حاصل ضرب الجهد في التيار، أي أن:

$$\text{volt-ampere} = V.I \quad v.a \qquad (2.9)$$

وتقاس بالڤولت أمبير، وهذه الوحدة لها نفس أبعاد وحدتي الوات والڤار. كما يتم استخدام الكيلوڤولت أمبير والميجاڤولت أمبير في منظومات القوى.

١.٢.٢ مثلث القدرة

بالنظر في المعادلات (2.7) و (2.8) و (2.9) فإنه يمكن رسم ما يسمى بمثلث القدرة power triangle والذي يحتوي على الأنواع الثلاث من القدرة. يبين الشكل ٢ ـ ٣ ـ أ مثلث القدرة لحمل حثي inductive load، كما يبين الشكل ٢ ـ ٣ ـ ب مثلث القدرة لحمل سِعوي capacitive load. بدراسة هذا المثلث يمكن كتابة العلاقة الآتية:

$$(Kva)^2 = (Kw)^2 + (Kvar)^2 \qquad (2.10)$$

$$\text{Power factor p.f} = \frac{Kw}{Kva} = \text{cosine } \phi \qquad (2.11)$$

$$Kvar = Kw.\tan\phi \qquad (2.12)$$

وتجدر الإشارة أنه للنظام ثلاثي الأطوار three-phase system فإن:

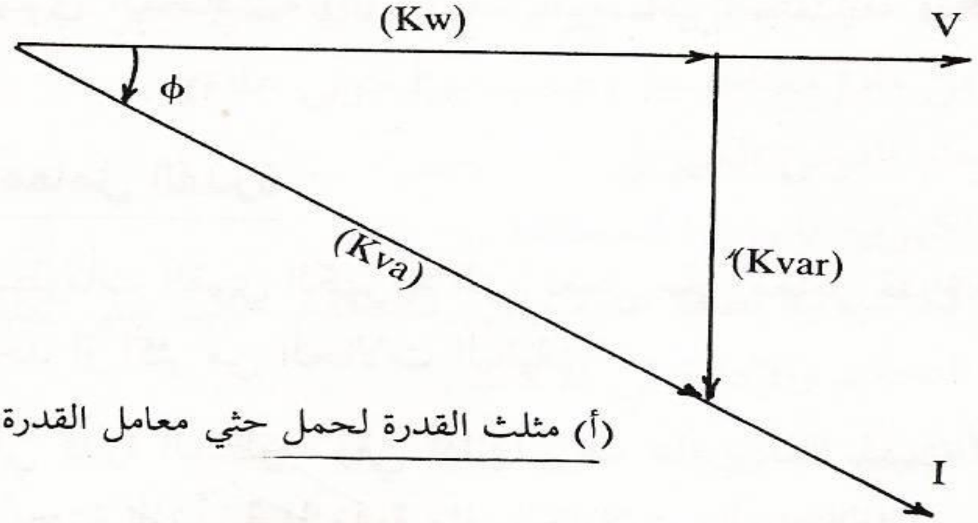
$$Kw = \frac{\sqrt{3} \times V \times I}{1000} \cos\phi \qquad (2.13)$$

حيث: Kw: القدرة الكلية في الأطوار الثلاثة بالكيلووات

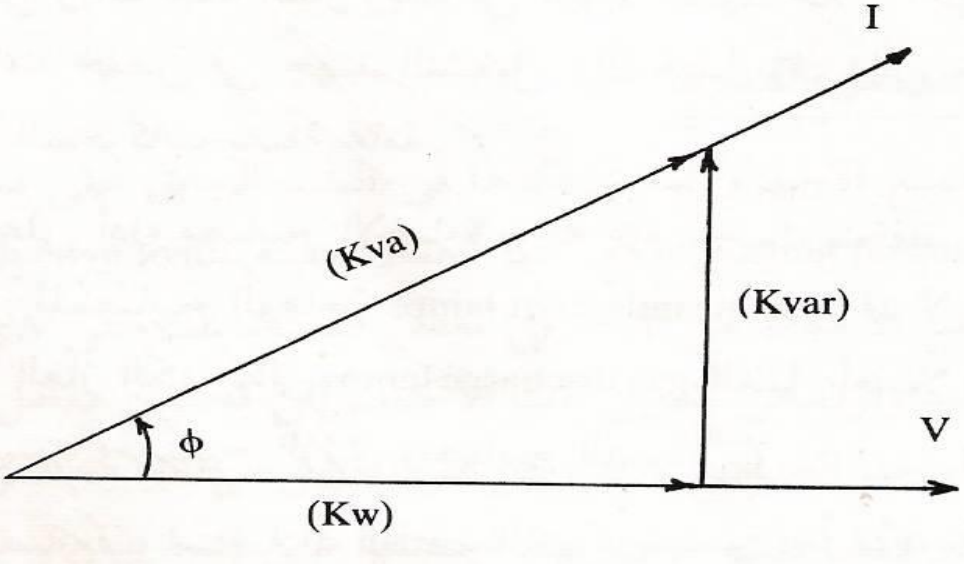
V: جهد الخط بالڤولت

I: تيار الخط بالأمبير

ϕ: الزاوية بين جهد الطور وتيار الطور.



(أ) مثلث القدرة لحمل حثي معامل القدرة متأخر



(ب) مثلث القدرة لحمل سعوي معامل القدرة متقدم

شكل ٢ ـ ٣ مثلث القدرة

وتسري المعادلة (2.13) للمنظومات المتماثلة فقط Symmetrical systems.

٣.٢ تأثير معامل القدرة

إن منظومات القوى الكهربية التي تعمل على معامل قدرة منخفض تكون معرضة لواحد أو أكثر من الحالات التالية:

١ - نقص في قدرة المنظومة وفي أدائها بوجه عام وذلك بسبب التحميل الزائد على الأجهزة الرئيسية للتغذية مثل الكابلات والمحولات.

٢ - زيادة في المفقودات النحاسية (I^2R)، وذلك بسبب زيادة مقدار التيار اللازم لنفس القدرة بالكيلوواط مع خفض قيمة معامل القدرة (راجع المعادلة 2.13).

٣ - ينتج عن زيادة قيمة التيار زيادة في هبوط الجهد خلال أجهزة التغذية مما ينتج عنه خفض في جهد التشغيل. إن هذا يؤدي إلى خفض في كفاءة تشغيل المحركات بصفة عامة.

٤ - التأثير على أداء مصابيح الإضاءة بوجه عام، حيث ينخفض مقدار الفيض الضوئي للمصابيح الوهاجة incandescent lamps بينما قد لا يمكن لمصابيح تفريغ الغاز الكهربائي gas discharge lamps العمل أصلاً (مثل مصابيح الفلورسنت ومصابيح الزئبق ومصابيح الصوديوم).

٥ - زيادة مصاريف استهلاك الطاقة الكهربية، حيث تُحمِّل شركات توزيع الكهرباء المستهلك عادة بمصاريف زائدة تعتمد على مقدار الانخفاض في معامل القدرة.

إن السبب الرئيسي في انخفاض معامل القدرة هو زيادة قيمة الكيلوڤار (القدرة المردودة) للأجهزة. إن أهم الأجهزة التي تحتوي على أحمال حثية (قدرة مردودة متأخرة) هي ما يأتي:

١ - المحركات الحثية induction motors وخاصة عندما تعمل على حمل أقل من حمل المقنن الكامل لها.

٢ ـ المحولات، حيث يمثل المحول محاثة عالية نظراً لكِبر عدد ملفاته وقلبه المكون من مادة مغناطيسية (صلب سيليكوني عادة).
٣ ـ أجهزة لحام القوس الكهربي.
٤ ـ الأفران الكهربية بأنواعها المختلفة.
٥ ـ الأجهزة الالكترونية بصفة عامة والتي تُستخدم حالياً على نطاق واسع في عمليات التحكم والإدارة في الآلات.
٦ ـ مصابيح التفريغ الغازي.
٧ ـ المقومات rectifiers.

علاوة على ما سبق فإن انخفاض معامل القدرة يتطلب زيادة في تحميل المولدات وخطوط نقل القوى عن طريق زيادة مركّبة التيار المردودة مما يؤدي إلى زيادة قيمة التيار الكلي بدون داع.

٤.٢ تحسين معامل القدرة

تعمل جميع الأجهزة السابق ذكرها في البند السابق على معامل قدرة متأخر (lagging power factor)، أي أنها أحمال حثية inductive loads. يتراوح معامل قدرة تلك الأحمال من ٠,٣ في بعض الصناعات وحتى ٠,٨. ويلجأ المهندسون المسئولون عن تشغيل تلك الأحمال إلى تحسين معامل قدرتها إلى ما يقرب من الواحد الصحيح وذلك عن طريق تعويض القدرة المردودة الحثية للحمل بقدرة مردودة أخرى سعوية يتم توصيلها على التوازي مع هذا الحمل. لِكَيْ نفهم فكرة تحسين معامل القدرة وتأثير ذلك على منظومة تغذية الأحمال ندرس الحالة العددية الآتية:

يشير الشكل ٢ ـ ٤ إلى محرك حثي ثلاثي الأطوار موصل على قضيب توزيع بالبيانات التالية:

جهد الخط لقضيب التوزيع = ٣٨٠ ڤولت
قدرة المحرك الداخلة = ٢٤ ك.و
معامل قدرة المحرك = ٠,٨ متأخر

يمكن بذلك حساب تيار المحرك (I_M) كما يأتي:

$$I_M = \frac{24 \times 1000}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.8} \qquad t2m4$$

$$= 45.6A$$

وهذا التيار بطبيعة الحال له مركبتان هما:

أ ـ مركبة منطقبة على الجهد (I_{MP}) حيث:

$$I_{MP} = I_M \cos\phi = 45.6 \times 0.8$$

$$= 36.48 \text{ A}$$

ب ـ مركبة عمودية على الجهد ومتأخرة عنه بزاوية طور ٩٠° (I_{MQ}) حيث:

$$I_{MQ} = I_M \sin\phi = 45.6 \times 0.6$$

$$= 27.36 \text{ A}$$

ويبين الشكل ٢ ـ ٥ مركبتي التيار بالنسبة للجهد وللتيار الكلي.

الكيلوڤولت أمبير المسحوب بواسطة المحرك $(KVA)_M$ هو:

$$(KVA)_M = \frac{P}{\cos\phi} = \frac{24}{0.8} = 30 \text{ KVA}$$

والكيلوڤار المسحوب بواسطة المحرك هو (Q_M) حيث:

$$Q_M = P \tan\phi = 24 \times \frac{6}{8}$$

$$= 18 \text{ KVAR}$$

التيار المسحوب من قضيب التوزيع هو (I_S)، حيث

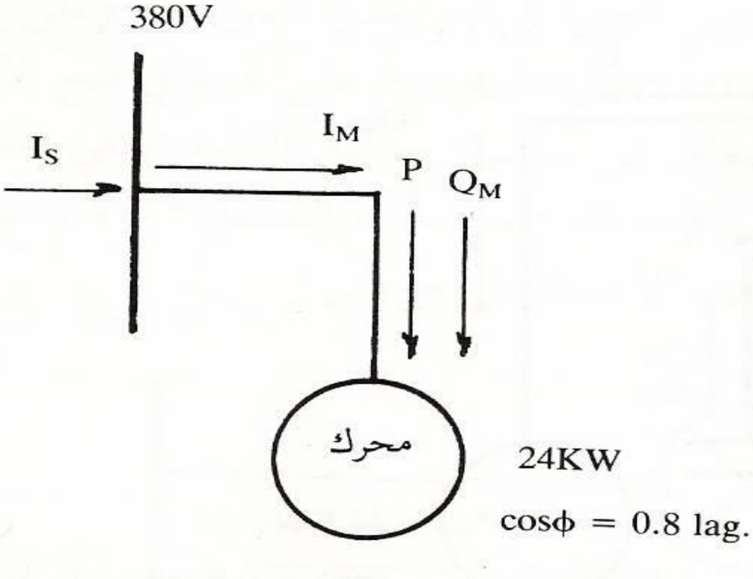
$$I_S = I_M = 45.6 \text{ A}$$

نفترض بعد ذلك أنه قد تم توصيل مكثف على التوازي مع المحرك بحيث يكون مقنن هذا المكثف هو (Q_C) حيث

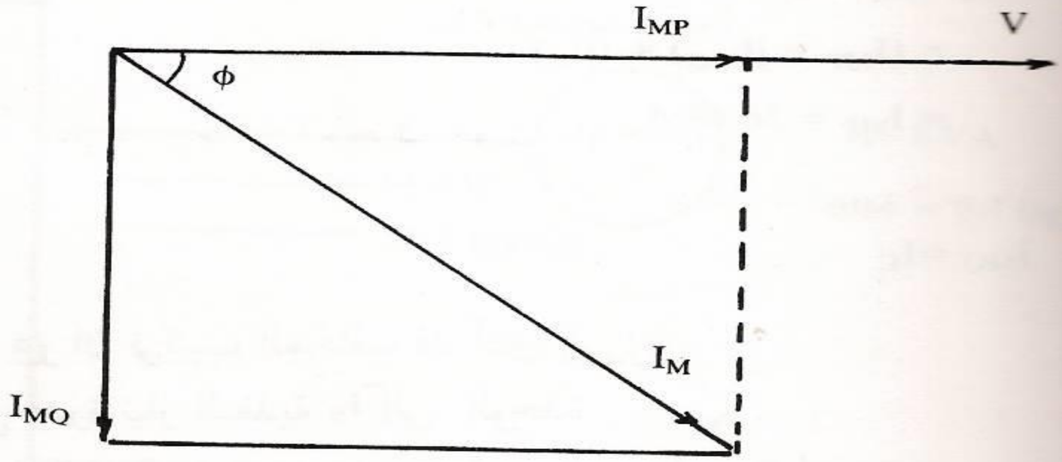
$$Q_C = Q_M$$

يبين الشكل ٢ ـ ٦ هذا التوصيل.

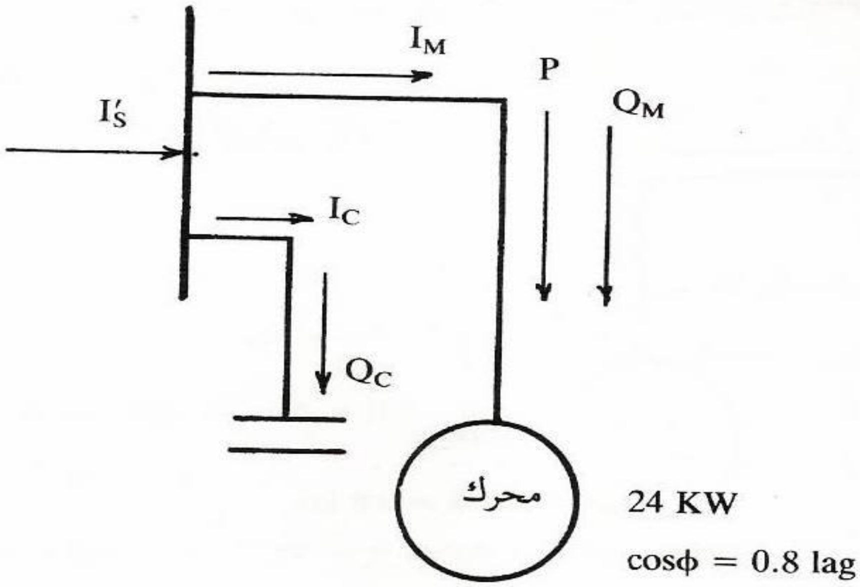
إن توصيل المكثف بهذه الطريقة لا يؤثر على المحرك في شيء حيث يظل المحرك يعمل بنفس الطريقة السابقة. إن الذي يتغير هو تيار التغذية فقط، حيث يصبح (I'_S) الذي يمكن حسابه كما يأتي:



شكل ٢ ـ ٤ محرك على قضيب توزيع (بدون تحسين لمعامل القدرة)



شكل ٢ ـ ٥ مركبتا تيار المحرك



شكل ٢ ـ ٦ توصيل مكثف على التوازي مع المحرك

$$\bar{I}'_S = \bar{I}_M + \bar{I}_C$$
$$= (I_{MP} - jI_{MQ}) + (jI_C)$$
$$= I_{MP} = 36.48 \text{ A.}$$

ونلاحظ أن

$$I_{MQ} = I_C$$

إن معنى ذلك هو أن تركيب المكثف قد أدى إلى :

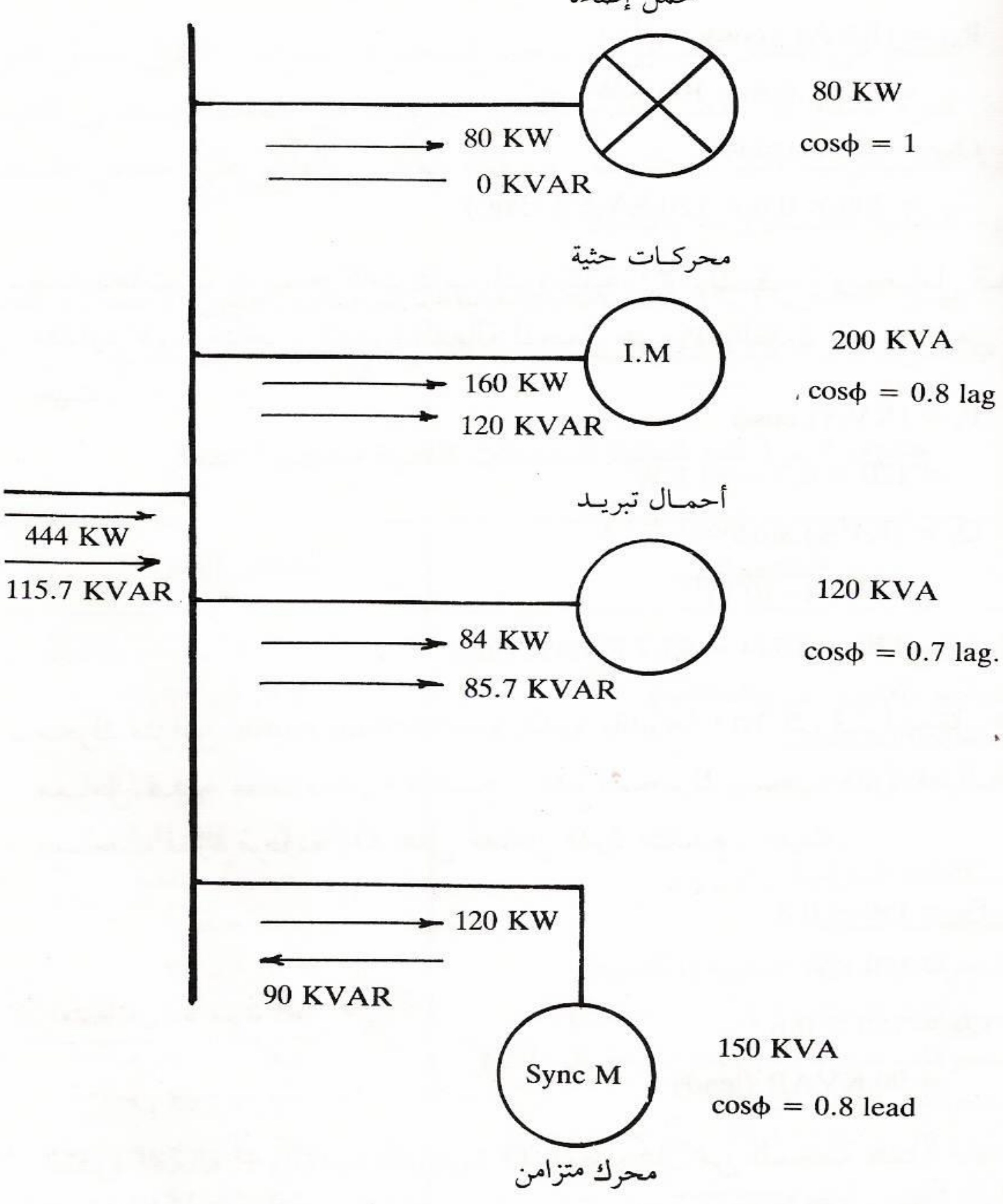
١ ـ رفع معامل قدرة تيار التغذية I_S إلى الوحدة

٢ ـ أنقص مقدار تيار التغذية من ٤٥,٦ أمبير إلى ٣٦,٤٨ أمبير.

٥.٢ مصادر القدرة المردودة

تعمـل معظم الآلات والأجهـزة المستعملة في الشبكات الكهـربية والمنشـآت الصناعية عل معامل قدرة متأخر، أي أنها تحتاج إلى قدرة مردودة حثية induc-tive reactive power لِكَيْ يمكنها تكوين المجال المغناطيسي اللازم لتشغيلهـا. تُعرف هذه الأجهزة بأنها أجهزة مستهلكـة للقدرة المـردودة. أما الأجهـزة التي

تعمل على معامل قدرة متقدم فهي أجهزة مولِّدة للقدرة المردودة. وعلى ذلك فإن توصيل تلك الأجهزة المولدة للقدرة المردودة على التوازي مع الأجهزة المستهلكة لها يؤدي بطبيعة الحال إلى تحسين معامل القدرة الكلي لمصدر التغذية. لتوضيح ذلك نعتبر الأحمال الموضحة بالشكل ٢ ـ ٧ والتي يتم تغذيتها من محطة محولات. هذه الأحمال هي ما يأتي :



شل ٢ ـ ٧ تأثير المحرك المتزامن

١ - أحمال إضاءة تتكون من مصابيح متوهجة بقدرة كلية ٨٠ ك.و، وبمعامل قدرة مقداره الوحدة، والحمل لا يحتوي بذلك على قدرة مردودة.

٢ - أحمال محركات حثية قدرة كلية ٢٠٠ ك.ف.أ، وبمعامل قدرة ٠,٨ متأخر. هذا الحمل يتكون مما يأتي:
قدرة فعالة P_M وقدرة مردودة Q_M حثية، حيث:

$$P_M = (KVA) \cdot \cos\phi$$
$$= 200 \times 0.8 = 160 \text{ KW.}$$
$$Q_M = (KVA) \sin\phi$$
$$= 200 \times 0.6 = 120 \text{ KVAR (lag.)}$$

٣ - مستودعات تبريد بمحركات ذات قدرة كلية ١٢٠ ك.ف.أ وبمعامل قدرة مقداره ٠,٧ متأخر. القدرة الفعالة للحمل هي P_t والقدرة المردودة هي Q_t حيث.

$$P_t = (KVA).\cos\phi$$
$$= 120 \times 0.7 = 84 \text{ KW}$$
$$Q_t = (KVA).\sin\phi$$
$$= 120.\sqrt{1-(0.7)^2}$$
$$= 120 \times 0.714 = 85.7 \text{ KVAR (lag)}$$

٤ - محرك متزامن synchronous motor بقدرة مقدرها ١٥٠ ك.ف.أ يعمل على معامل قدرة مقداره ٠,٨ متقدم. هذا المحرك يسحب قدرة فعالة P_S ويسحب قدرة مردودة Q_S على معامل قدرة متقدم، حيث:

$$P_S = 150 \times 0.8$$
$$= 120 \text{ KW}$$
$$Q_S = 150 \times 0.6$$
$$= 90 \text{ KVAR (lead)}$$

القدرة الفعالة P والقدرة المردودة Q المطلوبتان من المحطة هما:

$$P = 80 \times 160 + 84 + 120$$
$$= 444 \text{ KW}$$

$$Q = 0 + 120 + 85.7 - 90$$
$$= 115.7 \text{ KVAR}$$

والكيلوڤولت أمبير الكلي KVA هو:

$$KVA = \sqrt{(444)^2 + (115.7)^2}$$
$$= 4578.8 \text{ KVA}$$

يتضح من المثال السابق أن وجود المحرك المتزامن الذي يعمل على معامل قدرة متقدم قد أنقص مقدار القدرة المردودة من المحطة وبالتالي القيمة الكلية للكيلوڤولت أمبير المطلوب. إن هذا ينعكس بالطبع على خفض مقننات أجهزة التغذية كالمحولات والكابلات.

يبين الجدول ٢ ـ ١ قيماً نمطية لمعاملات قدرة بعض الأحمال، كما يبين الجدول ٢ ـ ٢ قيماً نمطية لمعاملات القدرة في بعض الصناعات.

جدول ٢ ـ ١ قيم نمطية لمعاملات القدرة لبعض الأحمال

الحمل	معامل القدرة
المصابيح المتوهجة	١,٠٠
مصابيح الفلورسنت (بالمكثف)	٠,٩٧ ـ ٠,٩٥
سخانات المقاومات	١,٠٠
المحركات المتزامنة	١,٠٠ أو متقدم (من ٠,٨ إلى ٠,٩ تبعاً للمقنن)
المكثفات المتزامنة	صفر أو متقدم
المكثفات الساكنة	صفر
المحركات الحثية الصغيرة (الكسرية)	٠,٧٥ ـ ٠,٥٥
المحركات الحثية (١ إلى ١٠ حصان)	٠,٨٥ ـ ٠,٧٥
المحركات الحثية السريعة (١٠ حصان وأكثر)	٠,٩٢ ـ ٠,٨٥
المحركات الحثية البطيئة	٠,٨٥ ـ ٠,٧٠
أجهزة اللحام	٠,٧٠ ـ ٠,٥٠
أفران القوس المهربي	٠,٩٠ ـ ٠,٨٠
الأفران الحثية	٠,٧٠ ـ ٠,٦٠

جدول ٢ ـ ٢ قيم نمطية لمعاملات القدرة لبعض الصناعات

الصناعـــة	معامل القدرة
صناعات النسيج	٠,٦٥ ـ ٠,٧٥
الصناعات الكيماوية	٠,٧٥ ـ ٠,٨٥
لحام القوس الكهربي	٠,٣٥ ـ ٠,٤٠
أفران القوس الكهربي	٠,٧٠ ـ ٠,٩٠
صناعات الأفران الحثية	٠,١٥ ـ ٠,٤٠
مصانع الأسمنت	٠,٧٨ ـ ٠,٨٠
مصانع الملابس	٠,٣٥ ـ ٠,٦٠
مصانع الصلب	٠,٦٠ ـ ٠,٨٥
مصانع الطوب	٠,٦٠ ـ ٠,٧٥
مستودعات التبريد	٠,٧٠ ـ ٠,٨٠
الطباعة	٠,٥٥ ـ ٠,٧٠
الدرفلة (بالثايرستور)	٠,٣٠ ـ ٠,٧٥

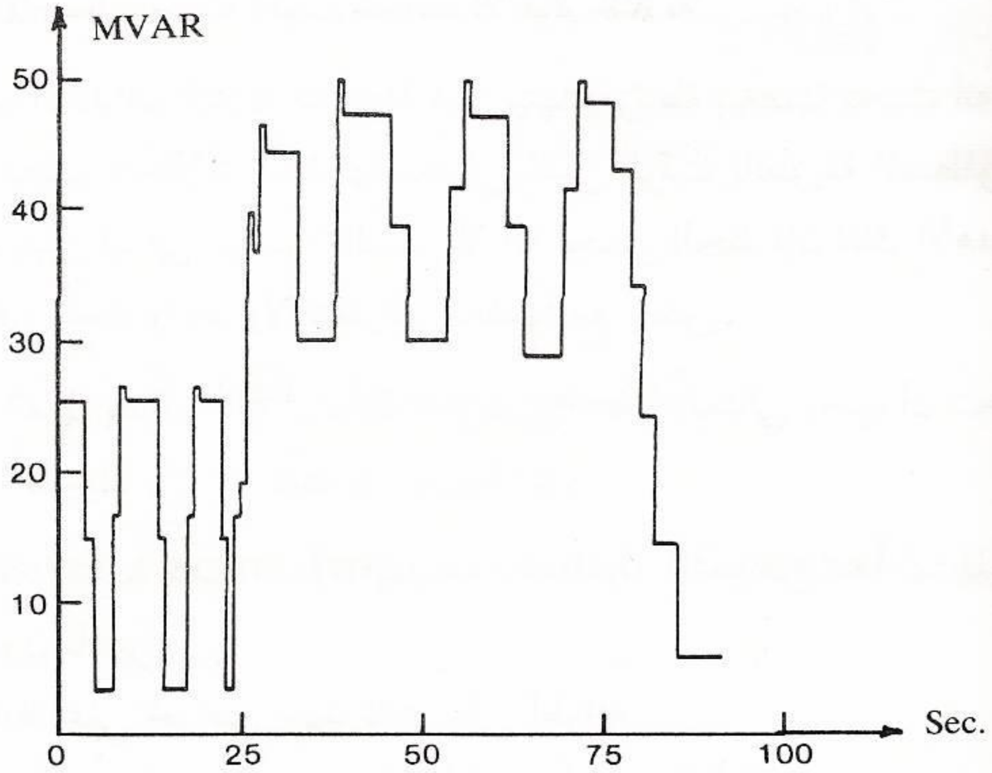
نود أن نشير هنا إلى أن الاتجاه الحديث في الصناعة الآن هو استخدام وسائل تشغيل وقيادة بتيار ثابت d.c.drives تستخدم نظام الفتح والقفل «on-off» mode بالاستعانة بالأجهزة الالكترونية كالثايرستور وغيره. إن مثل هذه الصناعات تزيد من تعقيد مشكلة القدرة المردودة وذلك بسبب ما يأتي:

أ ـ توليد توافقيات للجهد والتيار.

ب ـ تحتاج إلى قدرة مردودة عالية لعملية التقويم Commutation.

جـ ـ ليس لها عزم قصور دوراني rotational inertia، حيث يساعد عزم القصور الميكانيكي على تحسين خواص الشبكة والعمل على حفظ استقرارها الكهربي كما في حالة الأجهزة الدوارة بصفة عامة.

د ـ تُعرِّض الشبكة إلى تغيرات حادة وسريعة في القدرة المردودة المطلوبة من تلك الشبكة. يبين الشكل ٢ ـ ٨ نموذجاً نمطياً لتغير القدرة المردودة لأحد مصانع درفلة الصلب. نلاحظ من الشكل أن التغير كبير (في حدود ٥٠ ميجاڤار) بالإضافة إلى أنه حاد وسريع.



شكل ٢ ـ ٨ تغير نمطي في القدرة المردودة في صناعة درفلة الصلب.

٦.٢ دور المكثفات في تعويض الأحمال

نقصد من تعبير «تعويض الحمل load copensation» طريقة تـوليد والتحكم في القدرة المردودة لتحسين جودة مصدر التغذية quality of sypply في شبكات التيار المتـردد. ويُستخدم لفظ «تعـويض الحمل» حيثمـا تم استخدام القـدرة المردودة كـأداة لتحسين عمـل مصـدر التغـذيـة. ويتم تـركيب أجهـزة التعويض عادة في مـوقع المستهلك بـالقرب من الأحمـال. تُستخدم الأجهـزة الآتية كأجهزة تعويض للحمل load compensators.

١ ـ المكثفات المتزامنة.

٢ ـ المكثفات الساكنة.

٣ ـ المحركات المتزامنة (في حالة وجودها).

إن الأهداف الأساسية من عملية تعويض الحمل هي ما يأتي:

١ ـ تحسين معامل القدرة.

٢ ـ تحسين تنظيم الجهد Voltage regulation.

٣ ـ استقرار الأحمال بحيث تكون متماثلة الأطوار الثلاثة.

إن هذه الأهداف الثلاثة متداخلة فيما بينها ومرتبطة ببعضها بحيث أنه من الصعب في معظم الحالات تحقيقها معاً في نفس الوقت بالطريقة المطلوبة، وهو ما سوف يتبين لنا في الباب الثالث، إلا أنه لحسن الحظ فإن تلك الأهداف الثلاثة تسير في اتجاه واحد ولا تتعارض بعضها مع بعض.

يمكن القول بصفة عامة أن جهاز تعويض الحمل المثالي يجب أن تتحقق فيه الخواص الآتية:

أ ـ أنه يمكنه تسليم كمية القدرة المردودة المطلوبة للتعويض تبعاً لمتطلبات الحمل، وبدون تأخير.

ب ـ أن يحافظ على خواص جهد ثابتة على أطرافه.

حـ ـ أن يكون قادراً على العمل باستقلالية بين أطواره الثلاثة.

إن عملية تعويض الحمل هي مسئولية مشتركة بين الهيئة المسئولة عن التغذية والمستهلك نفسه، حيث تخضع تلك العملية إلى عوامل عديدة تتضمن حجم وطبيعة الحمل والمواصفات الوطنية والخبرة العامة، بالإضافة إلى تأثير عملية التعويض على باقي المستهلكين. إلا أنه يمكن القول بصفة عامة أن تحسين معامل القدرة والتشغيل على أحمال متزنة هي مسئولية المستهلك، حيث يضطر المستهلك إلى دفع مقابل عدم تحقيق ذلك. أما موضوع تحسين تنظيم الجهد فهو عادة من مسئوليات القائمين على تشغيل منظومة التغذية.

الباب الثالث

تحسين معامل القدرة
دراسة عامة
Power Factor Improvement - General

١.٣ مقدمة

علمنا من الباب الثاني أن أغلب الأجهزة في منظومات القوى تحتاج إلى قدرة مردودة لازمة لعمل تلك الأجهزة. ينشأ عن ذلك بطبيعة الحال أن تزيد كمية الكيلوڤولت أمبير المطلوبة لنفس القدرة الفعالة. إن هذا يمكن ترجمته إلى زيادة التيار الكلي المطلوب للحمل لكي يعمل على نفس مقنن القدرة الفعالة. ولكي تعمل المنظومة الكهربية كلها بطريقة مستقرة فإنه يلزم أن يكون هناك مصدر لتوليد هذه القدرة المردودة. فإذا لم يكن هناك أحمال ذات قدرة مردودة متقدمة وموصلة على التوازي مع أحمال القدرة المردودة المتأخرة على نفس قضيب التوزيع بحيث تلاشى القدرتان المردودتان بعضهما (كما وضح من مثال الباب الثاني) فإنه يتعين على مصدر التغذية إمداد قضيب التوزيع بالقدرة المردودة المتأخرة اللازمة للأحمال. إن ذلك يرجع بالآثار السيئة على جميع أجهزة الخدمة، كما يتم ترجمته إلى مبالغ إضافية من المال يدفعها المستهلك. سنوضح تلك الآثار في البند التالي.

٢.٣ تأثير معامل القدرة على أجهزة الخدمة

أجهزة الخدمة الرئيسية في منظومات القوى والتوزيع والاستخدام هي ما يأتي :

أ - المولدات .
ب - المحولات
جـ - خطوط النقل
د - كابلات التغذية والتوزيع

١.٢.٣ تأثير معامل القدرة على المولدات

يـرتبط عمل المـولد generator بعمـل المحرك الأسـاسي Prime-mover حيث تتحدد قدرة المولد الفعالة (KW) بقـدرة المحرك الأسـاسي بالكيلوات. علاوة على ذلك فإن للمولد مقنناً آخر هو الكيلوفولت أمبير (KVA) يختص به دون المحرك الأساسي وهو ناتج من ضرورة وجود مجال إثارة مغناطيسي excitation field داخـل المولـد نفسه. وتـرتبط تلك القدرتـان بـالعـلاقـة الأسـاسيـة المعروفة.

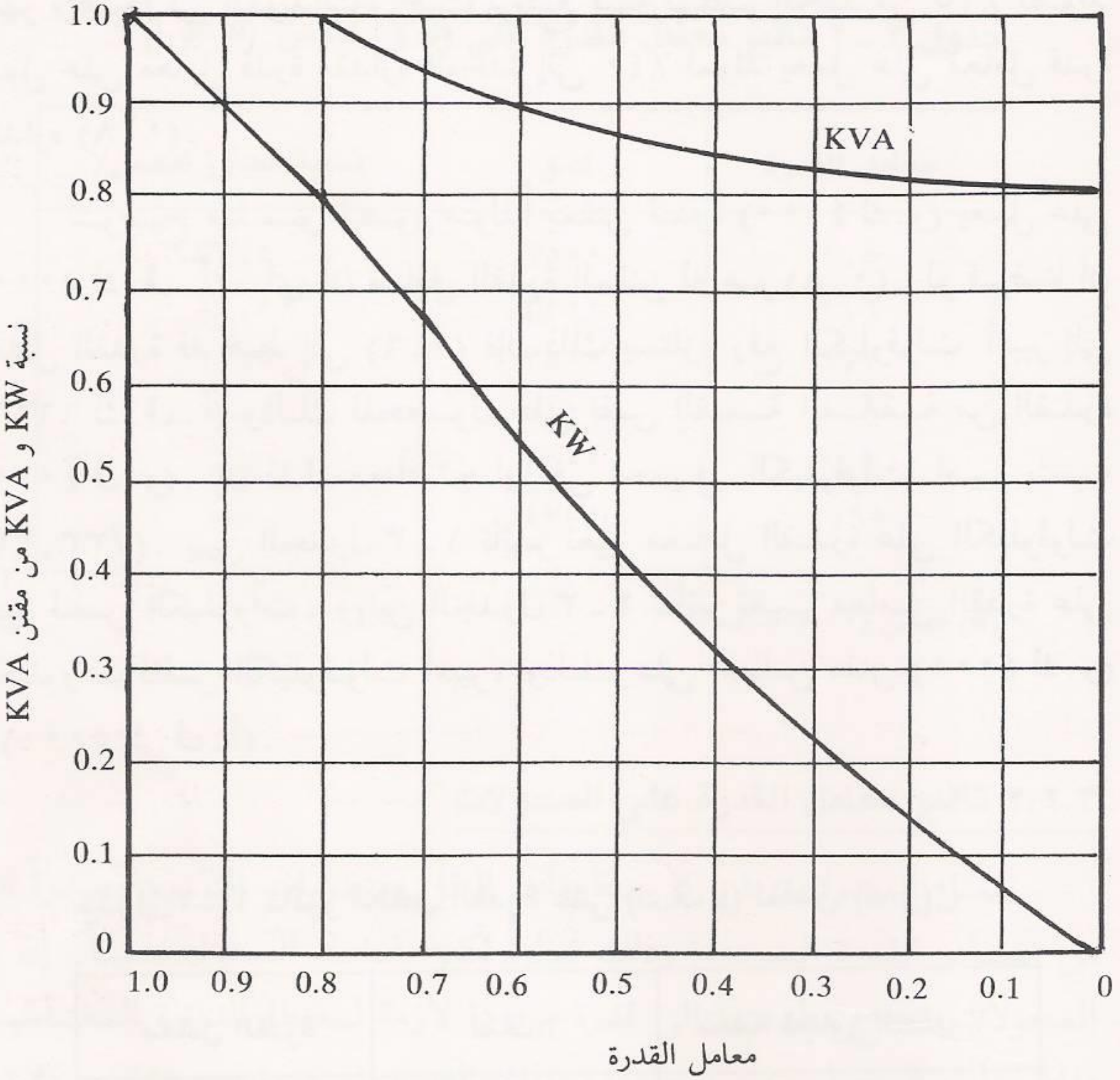
$$(KW) = (KVA).\cos\phi \quad \text{.......} \quad (3.1)$$

تعمل المولـدات عادة على معـامل قـدرة مقداره (cosϕ = 0.8)، بحيث يمكنها إمداد المنظومة بكمية من القدرة المردودة (KVAR) تعطى بالعلاقة :

$$(KVAR) = (KVA)\sin\phi \quad \text{.......} \quad (3 - 2)$$

يتبين من المعادلة (3.1) أنه لنفس القدرة بـالكيلووات فإن الكيلوفـولت أمبير المطلوب من المولد يزيد بانخفاض قيمة معامل القدرة. وبـالمثل، فـإنه لنفس الكيلوفولت أمبير فإن القدرة بالكيلووات التي يمكن أن يُخرجها المولـد تنخفض بانخفاض معامل القدرة. يوضح الشكل ٣ - ١ تأثير تغير معامل القدرة المتأخرة على العلاقة بين الكيلووات والكيلوفولت أمبير.

ينتج عن خفض معامل القدرة داخل المولد أن يصبح هـذا المولـد غير



شكل ٣ ـ ١ تأثير معامل القدرة المتأخرة على المولد (PF = 0.8)

قادر على حمل تيار الخط المقنن لأن المركبة المتأخرة للتيار ذي معامل القدرة المنخفض يكون لها تأثير مغناطيسي عكسي على مجال إثارة المولد. إن هذا يحتاج إلى زيادة كبيرة في تيار مجال المولد field current مما قد يكون له تأثير ضار على هذا المجال، وربما لا يمكن تحقيق هذا التيار أصلاً في ملفات مجال المولد.

علاوة على ما سبق فإن زيادة القدرة المردودة المتأخرة تعمل على زيادة تنظيم الجهد voltage regulation كما أشرنا إلى ذلك في البند ٢ ـ ٦. إن هذا

يظهر واضحاً في المولدات، حيث ترتفع قيمة تنظيم الجهد من ٢٥٪ لمولد يعمل على معامل قدرة مقداره الوحدة إلى ٤٠٪ لمولد يعمل على معامل قدرة مقداره (٠,٨).

لتوضيح ما سبق نتصور مولداً بمقنن قدرة (٤٠٠٠ ك. و) يعمل على (٥٠٠٠ ك. ف. أ)، أي أن معامل القدرة المقنن له هو (٠,٨). لو فرضنا أن معامل القدرة قد هبط إلى (٠,٦) فإن ذلك يستلزم رفع الكيلوفولت أمبير إلى (٦٦٦٦ ك. ف. أ) وذلك للحصول على نفس القيمة السابقة من القدرة (٤٠٠٠ ك. و). إن ذلك معناه تجاوز في تحميل الكيلوفولت أمبير بنسبة (٣٣,٣٣٪). يبين الجدول ٣ ـ ١ تأثير تغيير معامل القدرة على الكيلوفولت أمبير لنفس الكيلووات، ويبين الجدول ٣ ـ ٢ تأثير تغيير معامل القدرة على الكيلووات لنفس الكيلوفولت أمبير، وذلك على أساس مقنن (٤٠٠٠ ك. و) و (٥٠٠٠ ك. ف. أ).

جدول ٣ ـ ١ تأثير معامل القدرة على (ك.ف.أ) لنفس (ك.و)*

معامل القدرة	ك.ف.أ	نسبة تجاوز الحمل ٪
٠,٥	٨٠٠٠	٦٠
٠,٦	٦٦٦٦	٣٣,٣٣
٠,٧	٥٧٢٠	١٤,٥
٠,٨	٥٠٠٠	صفر
٠,٩	٤٤٤٤	صفر
٠,٩٥	٤٢١٠	صفر

(*) مقنن القدرة (٤٠٠٠ ك.و)

جدول ٣ ـ ٢ تأثير معامل القدرة على (ك.و) لنفس (ك.ف.أ)*

معامل القدرة	ك.و	نسبة تجاوز الحمل٪
٠,٥	٢٥٠٠	٣٧,٥
٠,٦	٣٠٠٠	٢٥,٠
٠,٧	٣٥٠٠	١٢,٥
٠,٨	٤٠٠٠	—
٠,٩	٤٥٠٠	—
٠,٩٥	٤٧٥٠	—

(*) المقنن (٥٠٠٠ ك.ف.أ)

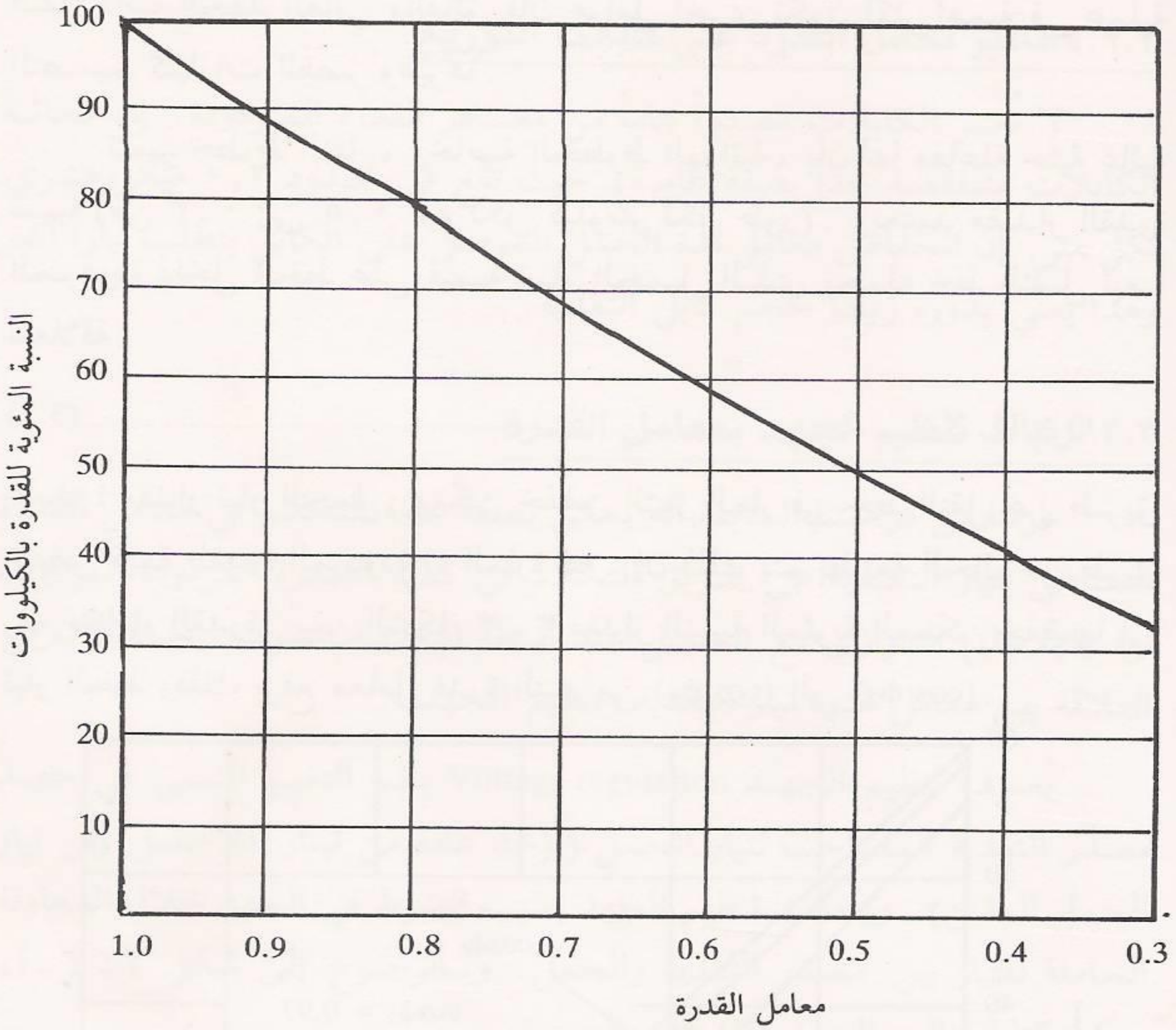
٣.٢.٢ تأثير معامل القدرة على المحولات

تمثل المحولات في كل منظومات النقل ومنظومات التوزيع مصدراً هاماً من مصادر القدرة المردودة وذلك نظراً لكبر مفاعلة المحول نسبياً. إن كل المحولات تحتاج بطبيعتها إلى قدرة مردودة لازمة لمغنطة الدائرة المغناطيسية داخل قلب المحول. ويتراوح مقدار تلك القدرة المردودة بين (١٪) و (١٢٪) من قدرة المحول المقننة بالكيلوفولت أمبير كما يوضح ذلك الجدول ٣ ـ ٣. علاوة على ما سبق، فإن استخدام المحول في تغذية أحمال حثية ذات معامل قدرة متأخر يزيد من كمية القدرة المردودة الموجودة داخل المحول. يمكن القول بأن قدرة المحول تتأثر بنفس الصورة التي تتأثر بها قدرة المولد وذلك بانخفاض معامل القدرة.

جدول ٣ ـ ٣ القدرة الرادة لمحولات التوزيع (VAR)

المقنن	٢٣/١٧,٥/١٢/٧,٢ ك.ف		٢٤ ك.ف		٣٦ ك.ف	
ك.ف.أ	لا حمل	حمل كامل	لا حمل	حمل كامل	لا حمل	حمل كامل
١٦	١٠٨٠	١٣٦٠	—	—	—	—
٢٥	١٥٠٠	٢١٣٠	١٧٤٠	٢٤٧٠	١٩٥٠	٢٩٨٠
٤٠	٢٠٢٠	٣١٧٠	٢٣٢٠	٣٦٨٠	٢٥٢٠	٣٨٨٠
٦٣	٢٥٠٠	٤٤٦٠	٣٠٢٠	٥٣٠٠	٣٤٨٠	٥٧٦٠
٨٠	٢٧٦٠	٥٣٤٠	٣٥٦٠	٦٥٤٠	٤٢٨٠	٧٢٦٠
١٠٠	٣٦٠٠	٦٩٢٠	٤١٦٠	٧٩٦٠	٥٠٨٠	٨٨٨٠
١٢٥	٤٥٠٠	٨٧٦٠	٥٠٠٠	٩٨٦٠	٦١٤٠	١١٠٠٠
١٦٠	٥٠٠٠	١٠٥٨٠	٦٠٥٠	١٢٣٩٠	٧٥٠٠	١٣٨٤٠
٢٠٠	٦٣٠٠	١٣٥٥٠	٧١٦٠	١٥١٦٠	٨٩٠٠	١٦٩٠٠
٢٥٠	٧٨٠٠	١٦٩٥٠	٨٦٢٠	١٨٩٧٠	١٠٧٠٠	٢١٠٥٠
٣١٥	١٠٠٠٠	٢١٧٠٠	١٠٣٠٠	٢٣٨٠٠	١٢٦٠٠	٢٦١٠٠
٤٠٠	١٠٨٠٠	٢٥٧٠٠	١٣٢٠٠	٣٠٠٠٠	١٥٢٠٠	٣٢٠٠٠
٥٠٠	١٣٥٠٠	٣٢٣٠٠	١٥٨٠٠	٣٦٨٠٠	١٨٠٠٠	٣٩٠٠٠
٦٣٠	١٧٠٠٠	٤٠٧٠٠	١٨٨٠٠	٤٣٦٠٠	٢١٢٠٠	٤٦٠٠٠

إن تحسين معامل القدرة من (٠,٧) إلى (٠,٩) يؤدي إلى خفض قيمة التيار بحوالي ٢٨٪ لنفس القدرة بالكيلووات. يبين الشكل ٣ ـ ٢ تأثير معامل القدرة على مقدرة المحول على تحمل الكيلووات. ويعطي الجدول ٣ ـ ٤ الزيادة المتاحة في القدرة بالكيلووات كنسبة مئوية من قدرة المحول المقننة وذلك لرفع معامل القدرة إلى (٠,٨٦).



شكل ٣ ـ ٢ تأثير معامل القدرة المتأخر على المحول

جدول ٣ ـ ٤ زيادة قدرة المحول بتحسين معامل القدرة إلى (٠,٨٦)

معامل القدرة الابتدائي	٠,٣	٠,٤	٠,٥	٠,٦	٠,٧	٠,٨
الزياة المتاحة في القدرة ٪ من قدرة المحول المقننة	٦٥	٥٣	٤٢	٣٠	١٨	٧

٣.٢.٣ تأثير معامل القدرة على خطوط النقل

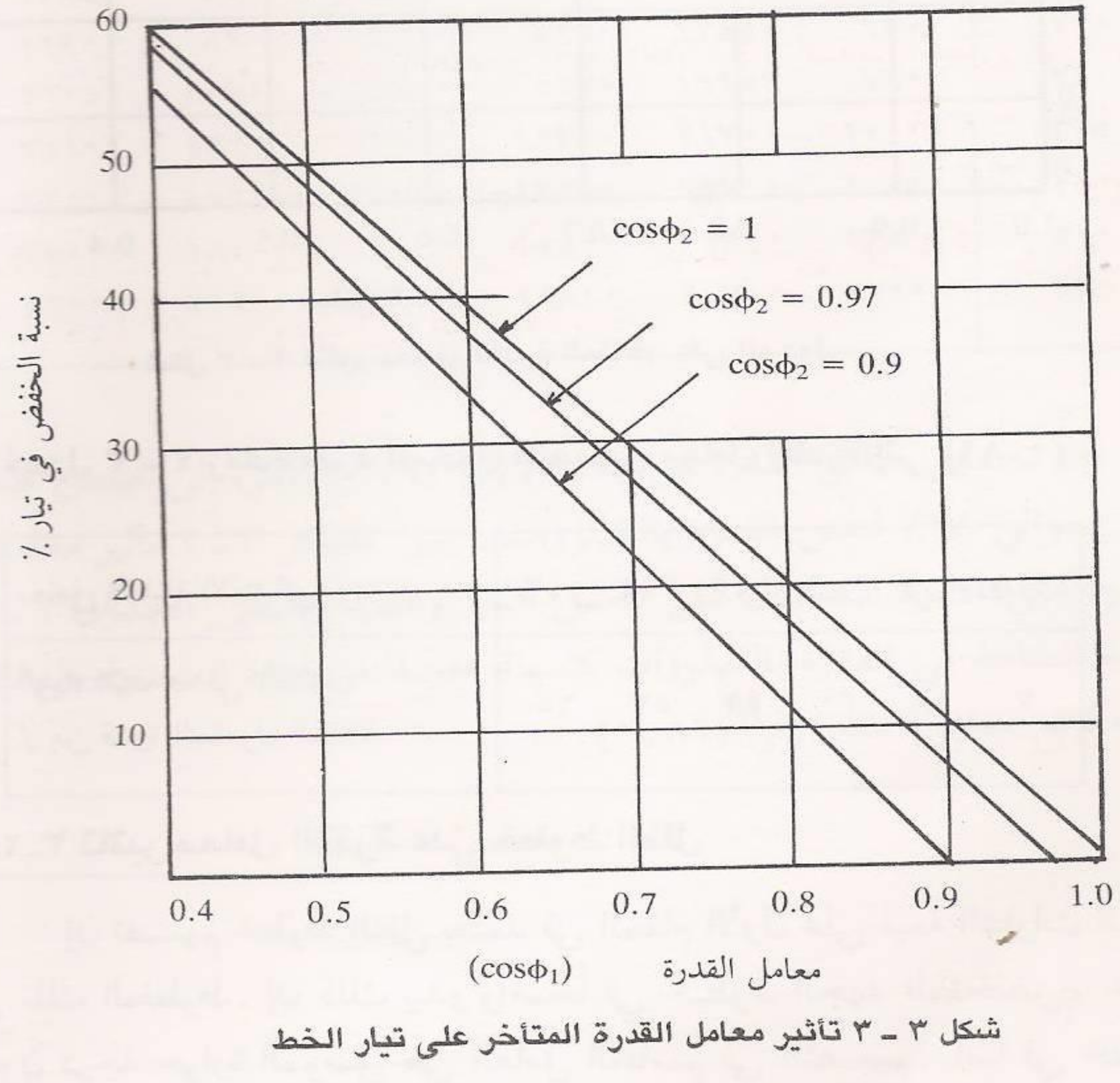
إن تصميم خطوط النقل يعتمد في المقام الأول على قيمة التيارات المارة في تلك الخطوط. إن ذلك يبدو واضحاً في خطوط الجهد المنخفض، حيث تكون درجة حرارة الموصل هي العامل الحاسم في التصميم. أما في خطوط

النقل ذات الجهد العالي والفائق فإن عوامل أخرى تكون أكثر أهمية في عملية التصميم كتيارات القِصر وغيرها.

تتميز خطوط النقل، وخاصة الخطوط الهوائية، بأن لها مفاعلة حثية عالية نسبياً (من ٠,٣ إلى ٠,٥ أوم لكل كيلومتر لكل طور). ويعتمد مقدار القدرة المردودة داخل الخط على قيمة تيار الحمل الذي يحمله خط النقل تبعاً للعلاقة:

$$Q = I^2 . X_L \qquad (3.2)$$

حيث I مقدار تيار الحمل. يمكن خفض التيار المار في خط النقل عن طريق خفض قيمة القدرة المردودة Q المارة فيه. إن ذلك يتم بطبيعة الحال عن طريق رفع معامل القدرة. يبين الشكل ٣ ـ ٣ مقدار النسبة المئوية الممكن خفضها في تيار الخط وذلك برفع معامل قدرة التيار من ($\cos \phi_1$) إلى ($\cos \phi_2$).



شكل ٣ ـ ٣ تأثير معامل القدرة المتأخر على تيار الخط

٤.٢.٣ تأثير معامل القدرة على كابلات التوزيع

لا تُعتبر الكابلات مصدراً هاماً من مصادر القدرة المردودة. إن محاثة الكابلات منخفضة جداً بصفة عامة، حيث تقع في حدود ٣,٠ ميكروهنري لكل متر. إن انخفاض معامل قدة الحمل الموصل على الكابل يتطلب تياراً أكبر وهذا يعني بدوره زيادة حجم كابل التغذية.

٣.٣ ارتباط تنظيم الجهد بمعامل القدرة

عرفنا من دراستنا السابقة أنه يمكن بصفة عامة التحكم في معامل القدرة الخاص بتيار التغذية عن طريق التحكم في كمية القدرة المردودة الواجب توصيلها على التوازي مع الحمل عند نقطة التغذية. سوف نبحث الآن في العلاقة بين معامل قدرة تيار التغذية وتنظيم الجهد.

يُعرف تنظيم الجهد Voltage regulation بأنه التغير النسبي في جهد مصدر التغذية المصاحب لتيار الحمل (يؤخذ عادة من تيار اللاحمل إلى تيار الحمل المقنن). ويحدث تنظيم الجهد بسبب الهبوط في الجهد خلال المعاوقة الحاملة للتيار بين مصدر التغذية والحمل. وبالرجوع إلى شكل ٣ ـ ٤ ـ أ، يمكن كتابة تنظيم الجهد (R) على الصورة

$$R\% = \frac{|E| - |V|}{|V|} \times 100 \quad \text{(3.3)}$$

حيث V هو جهد المرجع reference voltage.

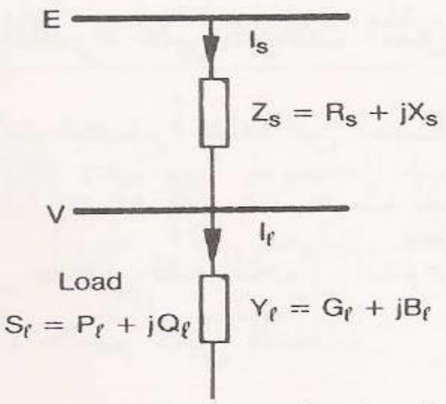
وبالرجوع إلى شكل ٣ ـ ٤ ـ ب يمكن حساب التغير في جهد المرجع (ΔV) نتيجة لتيار الحمل (I_l) كما يأتي:

$$\Delta\bar{V} = \bar{E} - \bar{V} = \bar{Z}_s.\bar{I}_l \quad \text{(3.4)}$$

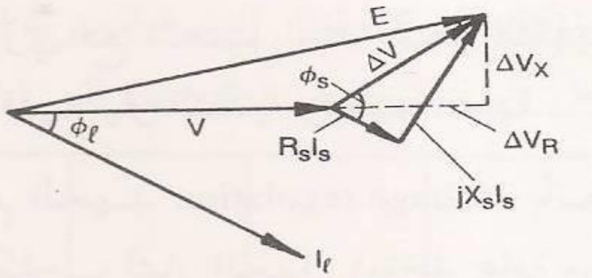
حيث: Z_s: المعاوقة بين مصدر التغذية ونقطة الحمل

$$Z_s = R_s + jX_s \quad \text{(3.5)}$$

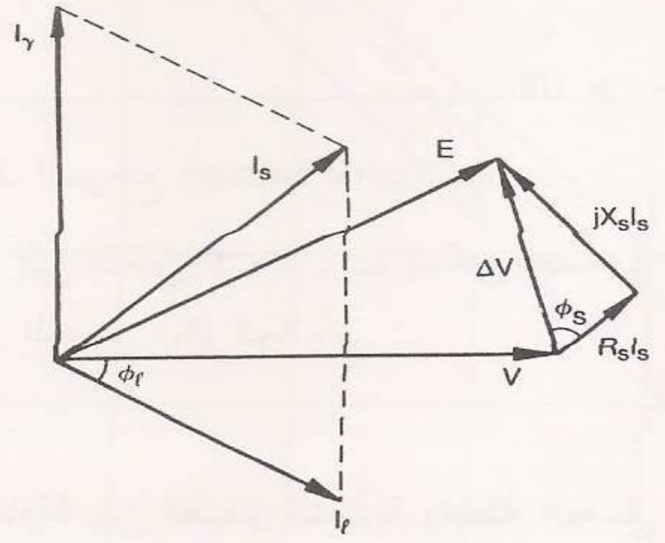
$$\bar{I}_l = \frac{P_l - jQ_l}{\bar{V}} \quad \text{(3.6)}$$



أ ـ الدائرة المكافئة للحمل والمصدر



ب ـ بياني المطاورات قبل تحسين تنظيم الجهد



حـ ـ بياني المطاورات بعد التحسين لجهد ثابت

شكل ٣ ـ ٤ تحسين تنظيم الجهد

أي أن

$$\Delta\bar{V} = (R_s + jX_s) \left\{ \frac{P_l - jQ_l}{\bar{V}} \right\} \quad \text{.......... (3.7)}$$

وباختصار المعادلة (3.7) نحصل على :

$$\Delta\bar{V} = \frac{(R_sP_l + X_sQ_l)}{V} + j\,\frac{X_sP_l - R_sQ_l}{V} \quad \text{.......... (3.8)}$$

$$\therefore\ \Delta\bar{V} = \Delta V_R + j\Delta V_x \quad \text{.......... (3.9)}$$

أي أن التغير في جهد الحمل له مركبتان، ΔV_R في اتجاه $\bar{V}$ و ΔV_x متعامدة على $\bar{V}$. ويعتمد مقدار $\Delta\bar{V}$ أساساً على مقدار Q_l التي تساوي في تلك الحال مقدار القدرة المردودة من المصدر.

يمكن عن طريق توصيل مصدر للقدرة المردودة على التوازي مع الحمل جعل $|\bar{E}| = |\bar{V}|$، أي نحصل على تنظيم للجهد مقداره الصفر. بالرجوع إلى الشكل ٣ ـ ٤ ـ جـ، وباعتبار إضافة مصدر للقدرة المردودة (Q_γ) يناظرها تيار (I_γ) عمودي على جهد الحمل $(\bar{V})$ فإن القدرة المردودة المطلوبة من مصدر التغذية (Q_s) تصبح :

$$Q_s = Q_\gamma + Q_l \quad \text{.......... (3.10)}$$

ويمكن اختيار قيمة Q_γ بحيث تجعل $|\bar{E}|$ تساوي $|\bar{V}|$ كما يأتي :

بوضع (Q_s) المعطاة من المعادلة (3.10) بدلاً من (Q_l) الموجودة في المعادلة (3.8)، وباستعمال المعادلات (3.4) و (3.6) و (3.8) يمكن الحصول على العلاقة الآتية :

$$|E|^2 = \left\{ V + \frac{R_sP_l + X_sQ_s}{V} \right\}^2 + \left\{ \frac{X_sP_l - R_sQ_s}{V} \right\}^2 \quad \text{.......... (3.11)}$$

وبحل المعادلة (3.11) يمكن الحصول على قيمة Q_s وبذلك يمكن إيجاد قيمة Q_γ على أساس أن :

$$Q_\gamma = Q_s - Q_l$$

بترتيب حدود المعادلة (3.11)

$$aQ_s^2 + bQ_s + c = 0$$

حيث

$$a = R_s^2 + X_s^2$$

$$b = 2V^2Xs$$

$$c = (V^2 + R_sP_l)^2 + X_s^2P_l^2 - E^2V^2$$

وبذلك يكون

$$Q_s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4a.c}}{2a} \qquad (3.12)$$

يتضح لنا من تلك الدراسة أنه يمكن دائماً التحكم في تنظيم الجهد بحيث يمكن الوصول إلى قيمة صفرية له عن طريق استخدام مصدر للقدرة المردودة على التوازي مع الحمل. ويجب الانتباه هنا إلى أن هذه القدرة المردودة تغير فقط في مقدار الجهد، أما زاوية الطور فهي تتغير دائماً مع تيار الحمل.

تجدر الإشارة هنا إلى حقيقة هامة وهي أنه لا يمكن لمصدر القَدرة المردودة التحكم في معامل القدرة وتنظيم الجهد في نفس الوقت. إن ذلك يرجع إلى ارتباط كل من الكميتين مع القدرة المردودة بطريقة مستقلة عن الأخرى. لتوضيح تلك الحقيقة نفترض أن المطلوب تحسين معامل القدرة إلى الواحد الصحيح. إن هذا يعني وضع Q_s بدلاً من Q_l في المعادلة (3.8) ثم وضع $(Qs = 0)$ في تلك المعادلة نحصل من ذلك على:

$$\Delta\bar{V} = (R_s + jX_s)\ \frac{P_l}{V} \qquad (3.13)$$

أي أن $\Delta\bar{V}$ لا يعتمد على Q_l وبذلك لا يمكن التحكم فيه بواسطة مصدر القدرة المردودة.

١.٣.٣ حساب تنظيم الجهد عملياً

وجدنا أنه يمكن استخدام المعادلة (3.8) في حساب قيمة الهبوط في الجهد عند حمل معين وبالتالي حساب تنظيم الجهد. يمكن الحصول على تلك القيمة بصورة أكثر فائدة كما يأتي:

إذا تم قَصّرُ الدائرة short-circuited عند قضيب التـوزيع المـوصل عليـه الحمل فإن قدرة القِصَر الظاهرة short-circuit apparent power (S_{SC}) تصبح

$$S_{sc} = P_{sc} + jQ_{sc} = EI^{*}_{sc}$$

$$= \frac{E^2}{Z_{sc}} \quad \text{.......... (3.14)}$$

حيث

$$R_s = Z_{sc} \cos\phi_{sc}$$

$$= \frac{E^2}{S_{sc}} \cos\phi_{sc} \quad \text{.......... (3.15)}$$

$$X_{sc} = Z_{sc} \sin\phi_{sc}$$

$$= \frac{E^2}{S_{sc}} \sin\phi_{sc} \quad \text{.......... (3.16)}$$

$$\tan\phi_{sc} = \frac{X_s}{R_s} \quad \text{.......... (3.17)}$$

وبالتعويض في المعادلة (3.9) وترتيب الحدود مـع فرض أن ($E \simeq V$) نحصـل على :

$$\frac{\Delta V_R}{V} \simeq \frac{1}{S_{sc}} [P_1 \cos\phi_{sc} + Q_1 \sin\phi_{sc}] \quad \text{.......... (3.18)}$$

و

$$\frac{\Delta V_x}{V} \simeq \frac{1}{S_{sc}} [P_1 \sin\phi_{sc} - Q_1 \cos\phi_{sc}] \quad \text{.......... (3.19)}$$

ومع ملاحظة أن التأثير الرئيسي للكمية ΔV_x هي تغيير زاوية الطور فقط، أي أن تأثيرها مهمل بالنسبة لمقدار الجهد، فإن معظم التغيير في مقدار الجهد يعتمد أساساً على ΔV_R. وعلى ذلك فإن المعادلة (3.18) تستعمل بكثرة لتقدير قيمة التنظيم في الجهد رغم أنها معادلة تقريبية. إن السبب في ذلـك هو أنهـا مكتوبة بدلالة الكميات المعروفة عادة لأي منظومة وهي :

i - قدرة القصر الظاهرية

ii - النسبة $\frac{X}{R}$

iii - الحمل الموصل.

وعند الحاجة للحصول على القيمة الدقيقة يمكن ضرب الكمية الناتجة من كل من المعادلتين (3.18) و (3.19) في الكمية ($\frac{E^2}{V^2}$).

يمكن استخدام المعادلتين (3.18) و (3.19) لأي قيمة من تغير الحمل لكل من P_l و Q_l وذلك من الصفر حتى مقنن الحمل الكامل. ويمكن علاوة على ذلك حساب التغيرات الصغيرة في تنظيم الجهد نتيجة للتغيرات الصغيرة في كل من P_l و Q_l وذلك باستخدام المعادلة (3.18) على الصورة

$$\frac{\Delta V_R}{V} = \frac{1}{S_{sc}} [\Delta P_l \cos\phi_{sc} + \Delta Q_l \sin\phi\, s_c] \quad (3.20)$$

٤.٣ المفقودات ومعامل القدرة

تؤدي عمليات نقل وتوزيع القدرة المردودة إلى نوعين من المفقودات:

i - مفقودات قدرة فعالة خلال مقاومات الدوائر.

ii - مفقودات قدرة مردودة خلال المفاعلات.

١.٤.٣ مفقودات القدرة الفعالة

تؤدي مفقودات القدرة الفعالة إلى رفع درجة حرارة الآلات والأجهزة كالكابلات والمحولات والأجهزة الأخرى. تقاس تلك المفقودات بالكيلووات وتتحول إلى طاقة حرارية بمرور الزمن تقاس بالكيلووات ساعة ((KWh) والتي يجب أن يُدفع ثمنها.

يمكن حساب مفقودات القدرة الفعالة في منظومة ثلاثية الأطوار من العلاقة الآتية:

$$P_p = 3.I^2.R \quad (3.21)$$

$$P_p = 3.I_p^2.R + 3.I_q^2.R \quad (3.22)$$

حيث: P_p: القدرة الفعالة المفقودة

I: مقدار التيار الكلي في الدائرة

I_p: مركبة التيار الفعالة (في طور الجهد)

I_q: مركبة التيار المردودة (عمودية على الجهد)

R: مقاومة الدائرة المار فيها التيار.

يتضح من المعادلة (3.22) أن مقدار مفقودات القدرة الفعالة بسبب مركبة التيار I_q لا يعتمد على مقدار القدرة الفعالة المنقولة. وعلى هذا فإن انخفاض معامل القدرة (الذي يناظره ارتفاع نسبي في مقدار I_q) يؤدي بالضرورة إلى زيادة مفقودات النقل.

يمكن حساب مقاومة الكابلات باستعمال العلاقة التقريبية الآتية بصورة مقبولة.

$$R = K.\frac{L}{A} \qquad \text{(3.23)}$$

حيث: R: مقاومة الكابل بالأوم

K: ثابت يؤخد كما يأتي

($K = 0.02\ ohm.mm^2/m$) للكابلات النحاسية

($K = 0.33\ ohm.mm^2/m$) للكابلات الألومنيوم

L: طول الكابل بالمتر

A: مساحة مقطع الكابل بالمللي متر المربع

يمكن كذلك استخدام الجدول ٣ ـ ٥ في استخراج مقاومة موصل الكابل عند ٢٠°م للتيار الثابت. ويجب ضرب هذه المقاومة في الكمية (١,١) للحصول على مقاومة الموصل للتيار المتردد عند درجة حرارة ٢٠°م. وللحصول على مقاومة الموصل عند درجات حرارة مختلفة تضرب القيمة المستخرجة من الجدول ٣ ـ ٥ في معامل التصحيح المستخرج من الجدول ٣ ـ ٦.

جدول ٣ ـ ٥ مقاومة اللكابلات عند ٢٠°م

	أقصى مقاومة تيار ثابت		
حجم الموصل مم^{2}	نحاس صافي (أوم/كم)	نحاس مطلي بالمعدن (أوم/كم)	الومنيوم (أوم/كم)
٠,٥	٣٦,٠	٣٦,٧	
٠,٧٥	٢٤,٥	٢٤,٨	
١	١٨,١	١٨,٢	
١,٥	١٢,١	١٢,٢	
٢,٥	٧,٤١	٧,٥٦	
٤	٤,٦١	٤,٧٠	٧,٤١
٦	٣,٠٨	٣,١١	٤,٦١
١٠	١,٨٣	١,٨٤	٣,٠٨
١٦	١,١٥	١,١٦	١,٩١
١٥	٠,٧٢٧	٠,٧٣٤	١,٢٠
٣٥	٠,٥٢٤	٠,٥٢٩	٠,٨٦٨
٥٠	٠,٣٨٧	٠,٣٩١	٠,٦٤١
٧٠	٠,٢٦٨	٠,٢٧٠	٠,٤٤٣
٩٥	٠,١٩٣	٠,١٩٥	٠,٣٢٠
١٢٠	٠,١٥٣	٠,١٥٤	٠,٢٥٣
١٥٠	٠,١٢٤	٠,١٢٦	٠,٢٠٦
١٨٥	٠,٠٩٩١	٠,١٠٠	٠,١٦٤
٢٤٠	٠,٠٧٥٤	٠,٠٧٦٢	٠,١٢٥
٣٠٠	٠,٠٦٠١	٠,٠٦٠٧	٠,١٠٠
٤٠٠	٠,٠٤٧٠	٠,٠٤٧٥	٠,٠٧٧٨

تابع جدول ٣ ـ ٥

حجم الموصل مم٢	نحاس صافي (أوم/كم)	نحاس مطلي بالمعدن (أوم/كم)	الومنيوم (أوم/كم)
	أقصى مقاومة تيار ثابت		
٥٠٠	٠,٠٣٦٦	٠,٠٣٦٩	٠,٠٦٠٥
٦٣٠	٠,٠٢٨٣	٠,٠٢٨٦	٠,٠٤٦٩
٨٠٠	٠,٠٢٢١	٠,٠٢٢٤	٠,٠٣٦٧
١٠٠٠	٠,٠١٧٦	٠,٠١٧٧	٠,٠٢٩١
١٢٠٠	٠,٠١٥١	٠,٠١٥١	٠,٠٢٤٧
١٤٠٠	٠,٠١٢٩	٠,٠١٢٩	٠,٠٢١٢
١٦٠٠	٠,٠١١٣	٠,٠١١٣	٠,٠١٨٦
١٨٠٠	٠,٠١٠١	٠,٠١٠١	٠,٠١٦٥
٢٠٠٠	٠,٠٠٩٠	٠,٠٠٩٠	٠,٠١٤٩

تبعاً للمواصفتين (IEC 228) و (BS 6791)

ملحوظة: يمكن الحصول على قيمة تقريبية لمقاومة التيار المتردد بضرب هذه القيمة في ١,١

جدول ٣ ـ ٦ معاملات تصحيح المقاومة لدرجات الحرارة

درجة حرارة الموصل °م	المعامل للتحويل إلى ٢٠°م	المقلوب للتحويل من ٢٠°م
٥	١,٠٦٤	٠,٩٤٠
٦	١,٠٥٩	٠,٩٤٤
٧	١,٠٥٥	٠,٩٤٨
٨	١,٠٥٠	٠,٩٥٢
٩	١,٠٤٦	٠,٩٥٦
١٠	١,٠٤٢	٠,٩٦٠
١١	١,٠٣٧	٠,٩٦٤
١٢	١,٠٣٣	٠,٩٦٨
١٣	١,٠٢٩	٠,٩٧٢
١٤	١,٠٢٥	٠,٩٧٦
١٥	١,٠٢٠	٠,٩٨٠
١٦	١,٠١٦	٠,٩٨٤
١٧	١,٠١٢	٠,٩٨٨
١٨	١,٠٠٨	٠,٩٩٢
١٩	١,٠٠٤	٠,٩٩٦
٢٠	١,٠٠٠	١,٠٠٠
٢١	٠,٩٩٦	١,٠٠٤
٢٢	٠,٩٩٢	١,٠٠٨
٢٣	٠,٩٨٨	١,٠١٢
٢٤	٠,٩٨٤	١,٠١٦

تابع جدول ٣ ـ ٦

درجة حرارة الموصل °م	المعامل للتحويل إلى ٢٠°م	المقلوب للتحويل من ٢٠°م
٢٥	٠,٩٨٠	١,٠٢٠
٢٦	٠,٩٧٧	١,٠٢٤
٢٧	٠,٩٧٣	١,٠٢٨
٢٨	٠,٩٦٩	١,٠٣٢
٢٩	٠,٩٦٥	١,٠٣٦
٣٠	٠,٩٦٢	١,٠٤٠
٣٥	٠,٩٤٣	١,٠٦٠
٤٠	٠,٩٢٦	١,٠٨٠
٤٥	٠,٩٠٩	١,١٠٠
٥٠	٠,٨٩٣	١,١٢٠
٥٥	٠,٨٧٧	١,١٤٠
٦٠	٠,٨٦٢	١,١٦٠
٦٥	٠,٨٤٧	١,١٨٠
٧٠	٠,٨٣٣	١,٢٠٠
٧٥	٠,٨٢٠	١,٢٢٠
٨٠	٠,٨٠٦	١,٢٤٠
٨٥	٠,٧٩٤	١,٢٦٠
٩٠	٠,٧٨١	١,٢٨٠

يمكن حساب مقاومة المحول (R) باستعمال العلاقة الآتية:

$$R = r_k . \frac{V^2}{S_N} \qquad (3.24)$$

$$r_k = \frac{P_k}{S_N} \qquad (3.25)$$

حيث: r_k: مقاومة قصر الدائرة النسبية (تسمّى أحياناً جهد المقاومة resistance voltage).

R: مقاومة المحول.

V: جهد التغذية المحسوبة عليه المقاومة

S_N: القدرة المقننة للمحول بالكيلوفولت أمبير

P_k: القدرة الفعالة بالكيلوواط والمستهلكة بواسطة المحول عندما يمر تيار المحول المقنن في أحد الملفين بينما الملف الآخر مُقْصراً. ويتم الحصول على قيمة P_k من الجداول عادة أو من ضمن مقننات المحول.

٢.٤.٣ مفقودات القدرة المردودة

يمكن دراسة مفقودات القدرة المردودة بطريقة مستقلة عن مفقودات القدرة الفعالة ولكن بنفس الأسلوب. تعطي المعادلة الآتية مفقودات القدرة المردودة في منظومة ثلاثية الأطوار.

$$Q_p = 3.I_q^2 . X \qquad (3.25)$$

حيث: Q_p: مفقودات القدرة المردودة

I_q: مركبة التيار العمودية على الجهد

X: مفاعلة الدائرة

يمكن حساب مفاعلة الكابلات وخطوط النقل بمعلومية محاثاتها وذلك باستخدام العلاقة:

$$X = 2.\pi.f.L$$

حيث: X : مفاعلة الكابل بالأوم لكل كيلومتر

f : تردد الدائرة

L : محاثلة الكابل بالهنري لكل كيلومتر، ويمكن حسابها من العلاقة الآتية:

أ: للكابلات وحيدة القلب Single-Core

$$KL = 0.2 \ln \frac{D}{d} + K \quad \text{.......... (3.26)}$$

ب: للكابلات ثلاثية القلب Three-Core

$$L = 0.2 \ln \frac{2S}{d} + K \quad \text{.......... (3.270}$$

حيث: D : القطر المتوسط للغلاف المعدني (مم)

d : قطر الموصل (مم)

S : المسافة بين مركزي موصلين في الكابل ثلاثي القلب

K : ثابت يعتمد على تكوين الموصل ومبين في الجدول ٣ ـ ٧ .

ذكرنا من قبل أن المفاعلات الحثية للكابلات صغيرة بصفة عامة ويمكن إهمالها. هذا بخلاف المحولات التي تختص بمفاعلات حثية عالية والتي يمكن حسابها من المعادلة الآتية:

جدول ٣ ـ ٧ قيم الثابت K في المعادلتين (3-26) و (3.27)

عدد أسلاك الموصل	K
٣	٠,٠٧٧٨
٧	٠,٠٦٤٢
١٩	٠,٠٥٥٤
٣٧	٠,٠٥٢٨
٦١ أو أكثر	٠,٠٥١٤

$$X = X_k \frac{V^2}{S_N} \quad \text{.......... (3.28)}$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2} \quad \text{.......... (3.29)}$$

حيث: X : مفاعلة المحول بالأوم

X_K : مفاعلة قصر الدائرة النسبية (تسمى أحياناً جهد المفاعلة)

Z_k : معاوقة قصر الدائرة النسبية (جهد المعاوقة)

V : جهد التغذية المحسوبة عليه المفاعلة

S_N : القدرة المقننة للمحول بالكيلوفولت أمبير.

يمكن الحصول على جهد المعاوقة من بيانات المحول. ويمكن الاسترشاد بالجدولين ٣ ـ ٨ و ٣ ـ ٩ في هذا الشأن.

٥.٣ مقارنة بين مصادر تحسين القدرة المردودة

يتم استخدام المصادر الآتية للقدرة المردودة بغرض تحسين معامل القدرة:

١ ـ المحركات المتزامنة Synchronous motors

٢ ـ المكثفات المتزامنة Synchronous Condensers

٣ ـ المكثفات الساكنة Static Capacitors

عند اختيار المصدر المناسب للقدرة المردودة فإن المقارنة تتم تبعاً لاعتبارات عديدة تحددها العوامل الآتية.

١ ـ مدى الثقة Reliability في عمل الأجهزة بالصورة المطلوبة منها دون أعطال أو انخفاض في جودة الأداء.

٢ ـ العمر الافتراضي للجهاز.

٣ ـ تكاليف الشراء والتركيب.

٤ ـ تكاليف التشغيل.

٥ ـ تكاليف الصيانة.

٦ ـ متطلبات المكان وسهولة التركيب.

٧ ـ ظروف التشغيل وطبيعته.

لقد كانت المكثفات المتزامنة هي المصدر الأساسي للقدرة المردودة في المنظومات الكهربية وخاصة منظومات النقل، وذلك على مدى فترة تزيد على

جـدول ٣ ـ ٨ قيم نمطية لجهـد المعاوقـة بالمـائة للمحـولات أحاديـة الطـور (٥٠ هرتز)

الجهد العالي ك.ف. / المقنن ك.ف.أ	٣,٣	٦,٦	١١	٣٣	٦٦	١١٠
٥	٤,٥	٤,٥	٤,٥			
٧,٥	٤,٥	٤,٥	٤,٥	٤,٧٥		
١٠	٤,٥	٤,٥	٤,٥	٤,٧٥		
١٥	٤,٥	٤,٥	٤,٥	٤,٥		
٢٠	٤,٥	٤,٥	٤,٥	٤,٥		
٢٥	٤,٥	٤,٥	٤,٥	٤,٥		
٣٠	٤,٥	٤,٥	٤,٥	٤,٥		
٤٠	٤,٥	٤,٥	٤,٥	٤,٥		
٥٠	٤,٥	٤,٥	٤,٥	٤,٥		
٧٥	٤,٥	٤,٥	٤,٥	٤,٥	٥,٥	
١٠٠	٤,٥	٤,٥	٤,٥	٤,٥	٥,٥	
١٢٥	٤,٥	٤,٥	٤,٥	٤,٥	٥,٥	٥,٥
٢٠٠	٤,٧٥	٤,٧٥	٤,٧٥	٥,٠	٥,٥	٦,٥
٢٥٠	٤,٧٥	٤,٧٥	٤,٧٥	٥,٠	٥,٥	٦,٥
٣٣٣	٤,٧٥	٤,٧٥	٤,٧٥	٥,٠	٦,٠	٧,٠
٥٠٠	٤,٧٥	٤,٧٥	٤,٧٥	٥,٠	٦,٠	٧,٠
٨٣٣		٥,٥	٥,٥	٦,٠	٧,٠	٧,٥
١٠٠٠		٥,٥	٥,٥	٦,٠	٧,٠	٧,٥
١٣٣٣		٦	٦	٦	٧,٠	٧,٥
١٦٦٧			٦,٠	٦,٠	٧,٠	٧,٥
٢٥٠٠			٦,٠	٧	٧,٥	٨,٠
٥٠٠٠			٧,٠	٨,٠	٨,٥	٩
٨٣٣٣				٩,٠	٩,٠	١٠,٠
١٠٠٠٠				١٠,٠	١٠,٠	١٠,٠

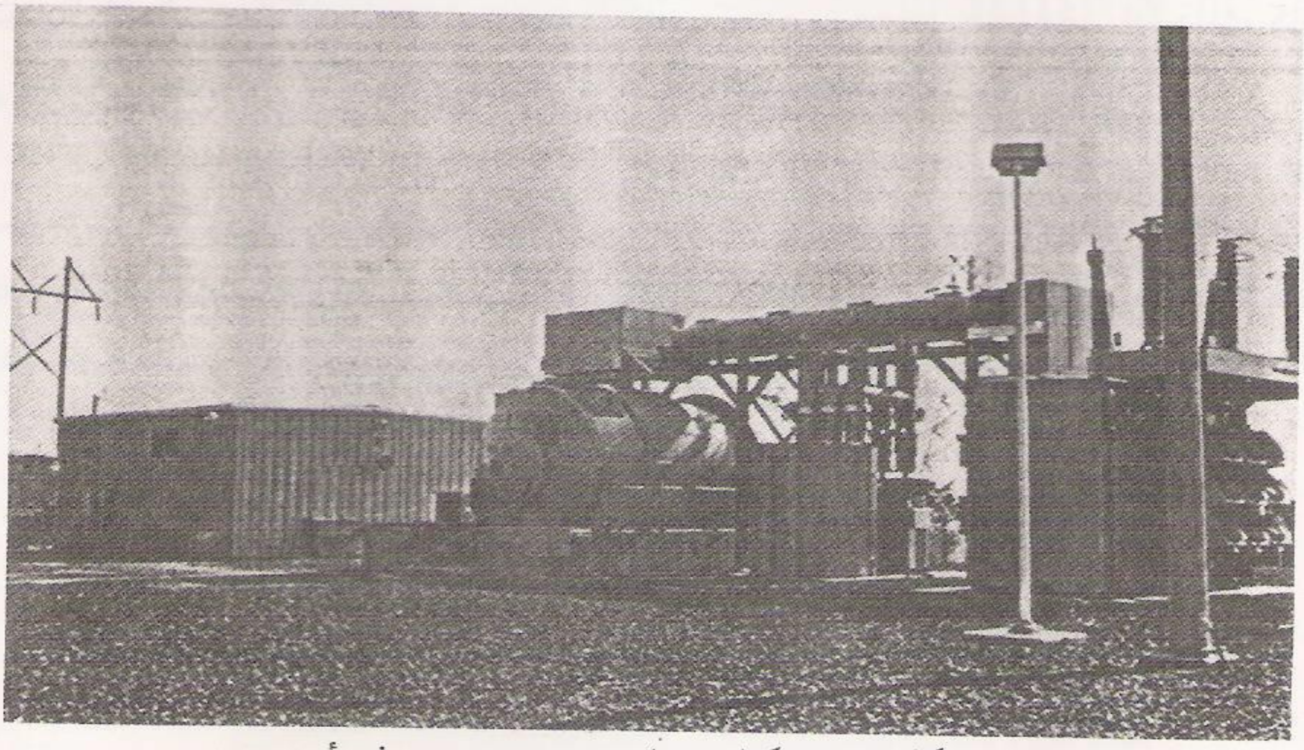
جدول ٣ - ٩ قيم نمطية لجهد المعاوقة بالمائة للمحولات ثلاثية الطور (٥٠ هرتز)

المقنن ك.ف.أ / الجهد العالي ك.ف.	٣,٣	٦,٦	١١	٣٣	٦٦	١١٠
٥	٤,٧٥	٤,٧٥	٤,٧٥	٦,٠		
٧,٥	٤,٧٥	٤,٧٥	٤,٧٥	٥,٢٥		
١٠ - ١٥	٤,٧٥	٤,٧٥	٤,٧٥	٤,٧٥		
٢٠ - ٧٥	٤,٥	٤,٥	٤,٥	٤,٥		
١٠٠ - ٢٠٠	٤,٧٥	٤,٧٥	٤,٧٥	٥,٠	٥,٥	
٢٥٠ - ٤٠٠	٤,٧٥	٤,٧٥	٤,٧٥	٥,٠	٥,٥	٦,٥
٦٠٠ - ١٠٠٠	٤,٧٥	٤,٧٥	٤,٧٥	٥,٠	٦,٠	٧,٠
١٢٥٠		٥,٠	٥,٠	٥,٥	٦,٥	٧,٠
١٥٠٠		٥,٥	٥,٥	٦,٠	٧,٠	٧,٥
٢٠٠٠		٦,٠	٦,٠	٦,٠	٧,٠	٧,٥
٢٥٠٠		٦,٠	٦,٠	٦,٠	٧,٠	٧,٥
٣٠٠٠			٦,٠	٧,٠	٧,٥	٨,٠
٤٠٠٠			٦,٠	٧,٠	٧,٥	٨,٠
٥٠٠٠			٦,٠	٧,٠	٧,٥	٨,٠
٦٠٠٠			٧,٠	٧,٥	٨,٠	٨,٥
٧٥٠٠			٧,٠	٨,٠	٨,٥	٩,٠
١٠٠٠٠				٩,٠	٩,٠	١٠,٠
١٢٥٠٠				٩,٠	٩,٠	١٠,٠
١٥٠٠٠				١٠,٠	١٠,٠	١٠,٠
٢٠٠٠٠				١٠,٠	١٠,٠	١٠,٠
٢٥٠٠٠				١٠,٠	١٠,٠	١٠,٠
٣٠٠٠٠				١٠,٠	١٠,٠	١٠,٠

خمسين عاماً. إلا أنه لعوامل عديدة، وأهمها العامل الاقتصادي، فقد بدأ الاستغناء عن المكثفات المتزامنة منذ أوائل السبعينات وذلك في المنظومات الصغيرة نسبياً كمنظومات توزيع القوى الكهربية وأغلب المنشآت الصناعية. وقد تم استبدالها بالمكثفات الساكنة. إن الميزة الأساسية للمكثفات المتزامنة على المكثفات الساكنة هي أن المكثفات المتزامنة لها خاصية إمكانية إمداد القدرة المردودة بكمية كبيرة في لحظات الطوارىء المصحوبة بانخفاض الجهد، وذلك على العكس من المكثفات الساكنة. ولعل هذا هو السبب في أن المهندسين لا يزالون يفضلون استعمال المكثفات المتزامنة في منظومات النقل حيث يتطلب الأمر مقننات عالية من القدرة المردودة.

يوجد استخدام آخر هام للمكثفات المتزامنة في خطوط نقل التيار الثابت ذات الجهد العالي (high volatge d.c. transmission (HVDC، حيث يتم استخدامها في إمداد القدرة المردودة اللازمة لعمل المقومات مما يؤدي إلى استقرار المنظومة وتقويتها حيث يكون منسوب القصر منخفضاً عند طرف جهد الاستقبال على جانب التيار المتردد. يبين الشكل ٣ ـ ٥ أحد المكثفات المتزامنة.

يمكن اعتبار المحركات المتزامنة مصدراً مناسباً للقدرة المردودة إذا وُجدت هذه المحركات أصلاً في المنشأة الصناعية. تعمل المحركات المتزامنة



شكل ٣ ـ ٥ مكثف متزامن بمقنن ١٦٧ م.ف.أ.ر

عادة على معامل قدرة يتراوح بين الوحدة و (٨, ٠ متقدم). وعلى هذا الأساس فإن الصناعات التي تحتاج إلى استخدام المحركات لمتزامنة يمكنها الاستفادة بقدرة تلك المحركات على تحسين معامل لقدرة. ويمكن القول بصفة عامة أن استخدام محركات حثية مع مكثفات ساكنة يكون أفضل دائماً من استخدام محركات متزامنة تعمل على معامل قدرة متقدم وأقل من (٨, ٠).

في الحالات التي تستخدم فيها المنشأة الصناعية محطة توليد خاصة بها فإن تلك المولدات تعمل عادة على معامل قدرة (٨, ٠ متأخر). وفي حالة ما إذا كانت تلك المنشأة تعمل على معامل قدرة متأخر أقل من ذلك فيُنصح بعمل تحسين لمعامل القدرة وذلك لتجنب هبوط الجهد ومفقودات التيار (I^2R) وبالتالي خفض قيمة مقنن المحطة.

تجدر الإشارة هنا إلى أن تحسين معامل القدرة إلى قيمة أكبر من (٩٥, ٠) ليس له ضرورة ولا يُنصح به عادة. إن ذلك يرجع إلى بعض شروط التشغيل وخاصة مع المحركات الحثية كما سيأتي بيانه على التفصيل في الباب القادم. علاوة على ذلك فإن حجم المكثف المطلوب يزيد بمعدل مرتفع جداً مع زيادة قيمة معامل القدرة عن (٩٥, ٠)، مما يجعل هذه الزيادة ليس لها ما يبررها من وجهة النظر الاقتصادية.

لقد كانت الميزة الأساسية للمكثفات المتزامنة هي إمكانية استخدامها كجهاز لتحسين تنظيم الجهد بالإضافة إلى تحسين معامل القدرة. إن ذلك كان يرجع إلى إمكانية التحكم فيها بطريقة أفضل من المكثفات الساكنة. إلا أن التطور الكبير في نظم التحكم الالكترونية والمصاحب للتطور التقني في صناعات الكترونيات القوى قد جعل إمكانية التحكم في المكثفات الساكنة يتم بصورة جيدة مما أدى إلى تفضيل استخدام تلك المكثفات في جميع المنشآت الصناعية حيث أنها تتميز بما يأتي:

١ ـ انخفاض تكاليف الشراء والتركيب.

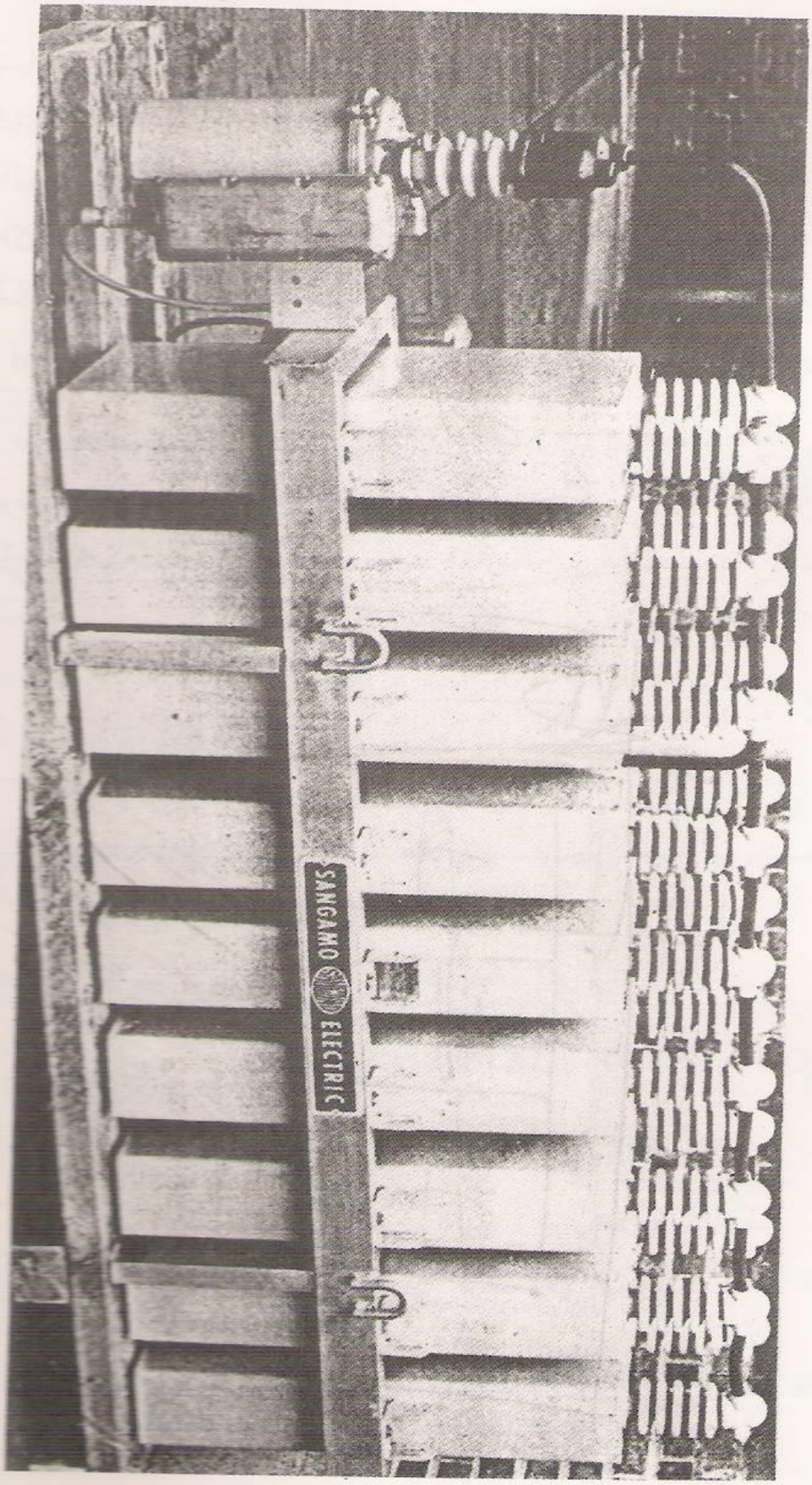
٢ ـ نظراً لأنها أجهزة ساكنة فإنها لا تحتاج تقريباً إلى صيانة تذكر.

٣ ـ تحتاج إلى حيز أقل للتركيب.

٤ ـ تعمل بكفاءة تامة وبجودة عالية.

٥ ـ عمرها الافتراضي مرتفع.

يبين الشكل ٣ ـ ٦ أحد المكثفات الساكنة المجمعة والتي تعمل على جهد منخفض. تتكون هذه التجميعة banking من مجموعة من الوحدات والتي يمكن استبدال أيٍ منها دون الإخلال بعمل باقي الوحدات.



شكل ٣-٦ تجميعة مكثفات ساكنة مكونة من وحدات منفصلة.

٦.٣ حساب حجم المكثف

يمكن تقدير حجم المكثف المطلوب (مقنن ك. ف. أ. ر) باستخدام إحدى الطرق الأربع الآتية:

١ ـ طريقة الحساب.
٢ ـ الطريقة البيانية.
٣ ـ باستخدام الجداول.
٤ ـ باستخدام المنحنيات.

١.٦.٣ طريقة الحساب

لتوضيح طريقة الحساب نتصور حملاً كلياً مقداره (٤٠٠ ك. و) يعمل على معامل قدرة (٠,٨ متأخر)، والمطلوب تحديد حجم المكثف اللازم لرفع معامل القدرة إلى (٠,٩ متأخر).

$$P = 400 \text{ KW.}$$

$$\text{p.f.} = 0.8$$

$$KVA = \frac{P}{\text{p.f.}}$$

$$= \frac{400}{0.8} = 500 \text{ Kva}$$

القدرة المردودة على الخط هي:

$$Q = \sqrt{(KVA)^2 - (KW)^2}$$

$$= \sqrt{(500)^2 - (400)^2}$$

$$= 300 \text{ Kvar.}$$

وعند رفع معامل القدرة إلى (٠,٩) فإن معنى ذلك أن يصبح:

$$KVA' = \frac{400}{0.9} = 444.44 \text{ Kva}$$

والقدرة المردودة النهائية هي :

$$Q' = \sqrt{(444.44)^2 - (400)^2}$$

$$= 193.7 \quad \text{Kvar.}$$

وبذلِك فإن حجم المكثف المطلوب يصبح

$$Q_C = Q - Q'$$

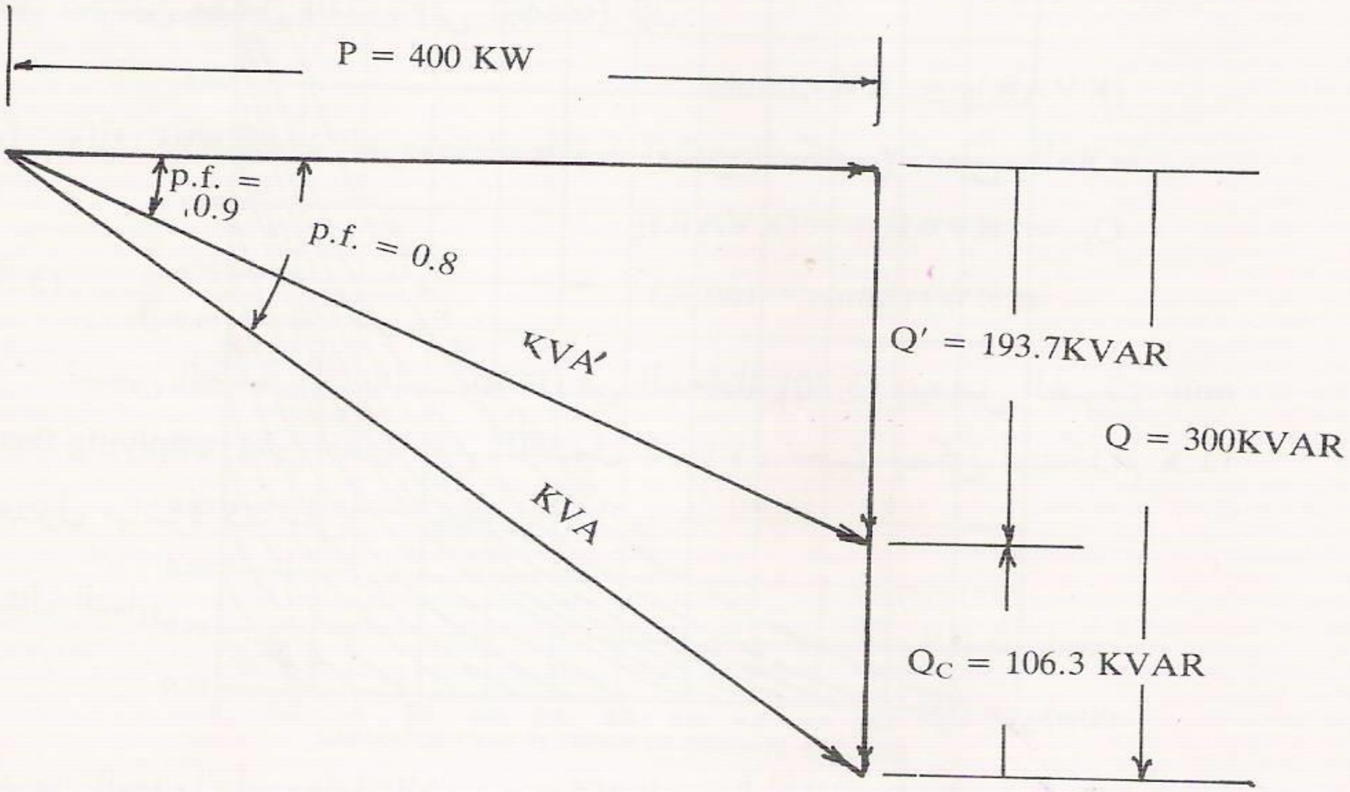
$$= 300 - 193.7$$

$$= 106.3 \quad \text{Kvar.}$$

رغم أن طريقة الحساب تعطي فكرة واضحة عن مقادير جميع الكميات إلا أنها طريقة مطولة نسبياً.

٢.٦.٣ الطريقة البيانية

يمكن تنفيذ نفس خطوات الطريقة الحسابية عن طريق الرسم. يبين الشكل ٣ ـ ٧ تنفيذ هذه الخطوات. بدأنا العمل برسم مثلث القدرة قبل التحسين وذلك بمعلومية قية القدرة الفعالة (٤٠٠ ك.و.) ومعامل القدرة



شكل ٣ ـ ٧ الطريقة البيانية لتحديد حجم المكثف.

المتأخر (٠,٨). وبعد ذلك يتم تكـوين مثلث جديـد يتكون من نفس القـدرة الفعالة (حيث أنها لا تتغير) ولكن بمعامل القدرة الجديد (٠,٩ متأخر). يمكن بذلك تعيين القدرة المردودة المناظرة ثم إيجاد مقنن المكثف المطلوب. يجب بطبيعة الحال تنفيذ تلك الطريقة باستخدام مقياس للرسم.

٣.٦.٣ باستخدام الجداول الجاهزة

هذه الطريقة هي أكثر الطرق استخداماً، حيث أنها تعطي مقنن المكثف المطلوب لتحسين معامل القدرة من ($\cos\phi_1$) إلى ($\cos\phi_2$) وذلك على النحو التالي:

يمكن كتابة العلاقات الآتية:

$$KW = (KVA)_1.\cos\phi_1$$

$$(KVAR)_1 = (KVA)_1.\ \sin\phi_1$$

ومنها، بالقسمة

$$(KVAR)_1 = (KW).\tan\phi_1$$

وعند تحسين معامل القدرة إلى ($\cos\phi_2$) فإن:

$$(KVAR)_2 = (KW).\tan\phi_2$$

وعلى ذلك فإن القدرة المردودة المطلوبة (مقنن المكثف) تعطى بالعلاقة

$$Q_C = (KVAR)_1 - (KVAR)_2$$

$$= (KW)\ (\tan\phi_1 - \tan\phi_2) \qquad (3.30)$$

تسمى الكمية ($\tan\phi_1 - \tan\phi_2$) في المعادلة (3.30) بمعامل الضرب multiplying factor، وهي مدوَّنة في الجدول ٣ ـ ١٠، حيث يمكن استخدام هـذا الجدول مباشرة كما يلي:

للمثال السابق

$$\cos\phi_1 = 0.8$$

$$\cos\phi_2 = 0.9$$

نجد من الجدول أن معامل الضرب = 0.266، وعلى ذلك فإن قدرة المكثف هي (تبعاً للمعادلة 3.30).

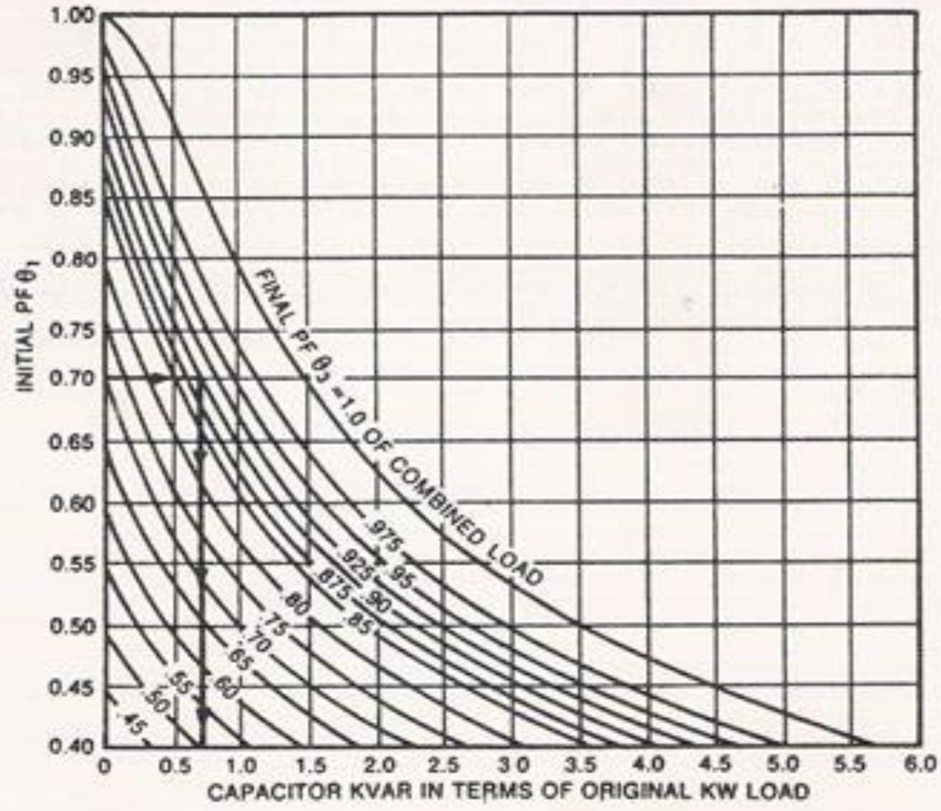
$$Q_C = 400 \times 0.266$$
$$= 106.4 \text{ Kvar}$$

وهي نفس النتيجة التي حصلنا عليها من قبل وذلك بالدقة المسموحة.

٤.٦.٣ باستخدام المنحنيات

قامت بعض الشركات بتجهيز منحنيات يمكن عن طريقها تحديد حجم المكثف المطلوب. بالإشارة إلى الشكل ٣ ـ ٨، نفرض أن المطلوب هو تحسين معامل القدرة من (٠,٧) إلى (٠,٩). نرسم خطاً أفقياً مقابل معامل القدرة (٠,٧) إلى أن يلاقي منحنى معامل القدرة (٠,٩) ثم نرسم خطاً رأسياً لتحديد معامل الضرب على المحور الأفقي حيث نجده يساوي (٠,٥٤) وعلى ذلك فإن حجم المكثف المطلوب لحمل مقداره (١٠٠٠ ك.و.) مثلاً هو:

$$Q_C = 1000 \times 0.54$$
$$= 540 \text{ Kvar.}$$



شكل ٣ ـ ٨

تعيين مقنن المكثف بيانياً بمعلومية معامل القدرة الابتدائي ($\cos \theta_1$) ومعامل القدرة النهائي ($\cos \theta_3$).

جدول ٣ ـ ١٠ معامل الضرب لتحسين معامل القدرة من ($\cos\phi_1$) إلى ($\cos\phi_2$) متأخر

$\cos\phi_1$*	معامل الضرب لتحسين معامل القدرة إلى:								
	١,٠٠	٠,٩٩	٠,٩٨	٠,٩٧	٠,٩٦	٠,٩٥	٠,٩٠	٠,٨٥	٠,٨٠
٠,٢٥	٣,٨٧٢	٣,٧٢٩	٣,٦٦٩	٣,٦٢١	٣,٥٨٠	٣,٥٤٣	٣,٣٣٨	٣,٢٥٢	٣,١٢٢
٠,٢٦	٣,٧١٤	٣,٥٧١	٣,٥١١	٣,٤٦٣	٣,٤٢٢	٣,٣٨٥	٣,٢٣٠	٣,٠٩٤	٢,٩٦٤
٠,٢٧	٣,٥٦٦	٣,٤٢٣	٣,٣٥٣	٣,٣١٥	٣,٢٧٤	٣,٢٣٧	٣,٠٨٢	٢,٩٤٥	٢,٨١٦
٠,٢٨	٣,٤٢٩	٣,٢٨٦	٣,٢٢٦	٣,١٧٨	٣,١٣٧	٣,١٠٠	٢,٩٤٥	٢,٨٠٩	٢,٦٧٩
٠,٢٩	٣,٣٠٠	٣,١٥٧	٣,٠٩٧	٣,٠٤٩	٣,٠٠٨	٢,٩٧١	٢,٨١٦	٢,٦٨٠	٢,٥٥٠
٠,٣٠	٣,١٨١	٣,٠٣٨	٢,٩٧٨	٢,٩٣٠	٢,٨٨٩	٢,٨٥٢	٢,٦٩٧	٢,٥٦١	٢,٤٣١
٠,٣١	٣,٠٦٥	٢,٩٩٢	٢,٨٦٢	٢,٨١٤	٢,٧٧٣	٢,٧٣٦	٢,٥٨١	٢,٤٤٥	٢,٣١٥
٠,٣٢	٢,٩٦٠	٢,٨١٧	٢,٧٥٧	٢,٧٠٩	٢,٦٦٧	٢,٦٣١	٢,٤٧٦	٢,٣٤٠	٢,٢١٠
٠,٣٣	٢,٨٦١	٢,٧١٨	٢,٦٥٨	٢,٦١٠	٢,٥٦٩	٢,٥٣٢	٢,٣٧٧	٢,٢٤١	٢,١١١
٠,٣٤	٢,٧٦٥	٢,٦٦٢	٢,٥٦٢	٢,٥١٤	٢,٤٧٣	٢,٤٣٦	٢,٢٨١	٢,١٤٥	٢,٠١٥

(*): صناعات الدرفلة والتحكم بالثايرستور والأفران الحثية عديمة القلب المستخدمة في الصناعات الثقيلة (coreless induction furnaces).

تابع جدول ٣ ـ ١٠

$\cos\phi_1$*	معامل الضرب لتحسين معامل القدرة إلى:								
	١,٠٠	٠,٩٩	٠,٩٨	٠,٩٧	٠,٩٦	٠,٩٥	٠,٩٠	٠,٨٥	٠,٨٠
٠,٣٥	٢,٦٧٧	٢,٥٣٤	٢,٤٧٤	٢,٤٢٦	٢,٣٨٥	٢,٣٤٨	٢,١٩٣	٢,٠٥٧	١,٩٢٧
٠,٣٦	٢,٥٩٢	٢,٤٤٩	٢,٣٨٩	٢,٣٤١	٢,٣٠٠	٢,٢٦٣	٢,١٠٨	١,٩٧٢	١,٨٤٢
٠,٣٧	٢,٥١١	٢,٣٦٣	٢,٣٠٨	٢,٢٦٠	٢,٢١٩	٢,١٨٢	٢,٠٢٧	١,٨٩١	١,٧٦١
٠,٣٨	٢,٤٣٤	٢,٢٩١	٢,٢٣١	٢,١٨٣	٢,١٤٢	٢,١٠٥	١,٩٥٠	١,٨١٤	١,٦٨٤
٠,٣٩	٢,٣٦٢	٢,٢١٩	٢,١٥٩	٢,١١١	٢,٠٧٠	٢,٠٣٣	١,٨٧٨	١,٧٤٢	١,١٦٢
٠,٤٠	٢,٢٩١	٢,١٤٨	٢,٠٨٨	٢,٠٤٠	١,٩٩٩	١,٩٦٢	١,٨٠٧	١,٦٧١	١,٥٤١
٠,٤١	٢,٢٢٥	٢,٠٨٢	٢,٠٢٢	١,٩٧٤	١,٩٣٣	١,٨٩٦	١,٧٤١	١,٦٠٥	١,٤٧٥
٠,٤٢	٢,١٦١	٢,٠١٨	١,٩٥٨	١,٩١٠	١,٨٦٩	١,٨٣٢	١,٦٧٧	١,٥٤١	١,٤١١
٠,٤٣	٢,١٠٠	١,٩٥٧	١,٨٩٧	١,٨٤٩	١,٨٠٨	١,٧٧١	١,٦١٦	١,٤٨٠	١,٥٣٠
٠,٤٤	٢,٤١	١,٨٩٨	١,٨٣٨	١,٧٩٠	١,٧٤٩	١,٧١٢	١,٥٥٦	١,٤٢١	١,٢٩١

(*): لحام القوس الكهربي وصناعات الغزل والنسيج.

تابع جدول ٣ ـ ١٠

$\cos\phi_1$*	معامل الضرب لتحسين معامل القدرة إلى: ١,٠٠	٠,٩٩	٠,٩٨	٠,٩٧	٠,٩٦	٠,٩٥	٠,٩٠	٠,٨٥	٠,٨٠
٠,٤٥	١,٩٨٤	١,٨٤١	١,٧٨١	١,٧٣٣	١,٦٩٢	١,٦٥٥	١,٥٠٠	١,٣٦٤	١,٢٣٤
٠,٤٦	١,٩٣٠	١,٧٨٧	١,٧٢٧	١,٦٧٩	١,٦٣٨	١,٦٠١	١,٤٤٦	١,٣١٠	١,١٨٠
٠,٤٧	١,٨٧٨	١,٦٣٥	١,٦٧٥	١,٦٢٧	١,٥٨٦	١,٥٤٩	١,٣٩٤	١,٢٥٨	١,١٢٨
٠,٤٨	١,٨٢٨	١,٦٨٥	١,٦٢٥	١,٥٧٧	١,٥٣٦	١,٤٩٩	١,٣٤٤	١,٢٠٨	١,٠٧٨
٠,٤٩	١,٧٧٩	١,٦٣٦	١,٥٧٦	١,٥٢٨	١,٤٨٧	١,٤٥٠	١,٢٩٥	١,١٥٩	١,٠٢٩
٠,٥٠	١,٧٣٢	١,٥٨٩	١,٥٢٩	١,٤٨١	١,٤٤٠	١,٤٠٣	١,٢٤٨	١,٢٢١	٠,٨٩٢
٠,٥١	١,٦٨٦	١,٥٤٣	١,٤٨٣	١,٤٣٥	١,٣٩٤	١,٣٥٧	١,٢٠٢	١,٠٦٦	٠,٩٣٦
٠,٥٢	١,٦٤٣	١,٥٠٠	١,٤٤٠	١,٣٩٢	١,٣٥١	١,٣١٤	١,١٥٩	١,٠٢٣	٠,٨٩٣
٠,٥٣	١,٦٠٠	١,٤٥٧	١,٣٩٧	١,٣٤٩	١,٣٠٨	١,٢٧١	١,١١٦	٠,٩٨٠	٠,٨٥٠
٠,٥٤	١,٥٥٩	١,٤١٦	١,٣٥٦	١,٣٠٣	١,٢٦٧	١,٢٣٠	١,٠٧٥	٠,٩٣٩	٠,٨٠٩

(*): صناعات الأساسات والورش والآلات.

تابع جدول ٣ ـ ١٠

$\cos\phi_1$*	معامل الضرب لتحسين معامل القدرة إلى: ١,٠٠	٠,٩٩	٠,٩٨	٠,٩٧	٠,٩٦	٠,٩٥	٠,٩٠	٠,٨٥	٠,٨٠
٠,٥٥	١,٥١٩	١,٣٧٦	١,٣١٦	١,٢٦٨	١,٢٢٧	١,١٩٠	١,٠٣٥	٠,٨٩٩	٠,٧٦٩
٠,٥٦	١,٤٨٠	١,٣٣٦	١,٢٧٧	١,٢٢٩	١,١٨٨	١,١٥١	٠,٩٩٦	٠,٨٦٠	٠,٧٣٠
٠,٥٧	١,٤٤٢	١,٢٢٩	١,٢٣٩	١,١٩١	١,١٥٠	١,١١٣	٠,٩٥٨	٠,٨٢٢	٠,٦٩٢
٠,٥٨	١,٤٠٥	١,٢٦٢	١,٢٠٢	١,١٥٤	١,١١٣	١,٠٧٦	٠,٩٢١	٠,٧٨٥	٠,٦٥٥
٠,٥٩	١,٣٦٩	١,٢٢٦	١,١٦٦	١,١١٨	١,٠٧٧	١,٠٤٠	٠,٨٨٥	٠,٧٤٩	٠,٦١٩
٠,٦٠	١,٣٣٣	١,١٩٠	١,١٣٠	١,٠٨٢	١,٠٤١	١,٠٠٤	٠,٨٤٩	٠,٧١٣	٠,٥٨٣
٠,٦١	١,٢٢٩	١,١٥٦	١,٠٩٦	١,٠٤٨	١,٠٠٧	٠,٩٧٠	٠,٨١٥	٠,٦٧٩	٠,٥٤٩
٠,٦٢	١,٢٦٥	١,١٢٢	١,٠٦٢	١,٠١٤	٠,٩٧٣	٠,٩٣٦	٠,٧٨١	٠,٦٤٥	٠,٥١٥
٠,٦٣	١,٢٣٣	١,٠٩٠	١,٠٣٠	٠,٩٨٢	٠,٩٤١	٠,٩٠٤	٠,٧٤٩	٠,٦١٣	٠,٤٨٣
٠,٦٤	١,٢٠١	١,٠٥٨	٠,٩٩٨	٠,٩٥٠	٠,٩٠٩	٠,٨٧٢	٠,٧١٧	٠,٥٨١	٠,٤٥١

(*): صناعات البلاستيك والطباعة

تابع جدول ٣ ـ ١٠

$\cos\phi_1$ *	معامل الضرب لتحسين معامل القدرة إلى:								
	١,٠٠	٠,٩٩	٠,٩٨	٠,٩٧	٠,٩٦	٠,٩٥	٠,٩٠	٠,٨٥	٠,٨٠
٠,٦٥	١,١٦٩	١,٠٢٦	٠,٩٦٦	٠,٩١٨	٠,٨٧٧	٠,٨٤٠	٠,٦٨٥	٠,٥٤٩	٠,٤١٩
٠,٦٦	١,١٣٨	٠,٩٩٥	٠,٩٣٥	٠,٨٨٧	٠,٨٤٦	٠,٨٠٩	٠,٦٥٤	٠,٥١٨	٠,٣٨٨
٠,٦٧	١,١٠٨	٠,٩٦٥	٠,٩٠٥	٠,٨٥٧	٠,٨١٦	٠,٧٧٩	٠,٦٢٤	٠,٤٨٨	٠,٣٥٨
٠,٦٨	١,٠٧٨	٠,٩٣٥	٠,٨٧٥	٠,٨٢٧	٠,٧٨٦	٠,٧٤٩	٠,٥٩٤	٠,٤٥٨	٠,٣٢٨
٠,٦٩	١,٠٤٩	٠,٩٠٦	٠,٨٤٦	٠,٧٩٨	٠,٧٥٧	٠,٧٢٠	٠,٥٦٥	٠,٤٢٩	٠,٢٩٩
٠,٠٧٠	١,٠٢٠	٠,٨٧٧	٠,٨١٧	٠,٧٦٩	٠,٧٢٨	٠,٦٩١	٠,٥٣٦	٠,٤٩٩	
٠,٧١	٠,٩٩٢	٠,٨٤٩	٠,٧٨٩	٠,٧٤١	٠,٧٠٠	٠,٦٦٣	٠,٥٠٨	٠,٣٧٢	٠,٢٤٢
٠,٧٢	٠,٩٦٤	٠,٨٢١	٠,٧٦١	٠,٧١٣	٠,٦٧٢	٠,٦٣٥	٠,٤٧٠	٠,٣٤٤	٠,٢١٤
٠,٧٣	٠,٩٣٦	٠,٧٩٣	٠,٧٣٣	٠,٦٨٥	٠,٦٤٤	٠,٦٠٧	٠,٤٥٢	٠,٣١٦	٠,١٨٦
٠,٧٤	٠,٩٠٩	٠,٧٦٦	٠,٧٠٦	٠,٦٥٨	٠,٦١٧	٠,٥٨٠	٠,٤٢٥	٠,٢٨٩	٠,١٥٩

(*): مستودعات التبريد وصناعات الطوب

تابع جدول ٣ ـ ١٠

$\cos\phi_1$*	معامل الضرب لتحسين معامل القدرة إلى: ١,٠٠	٠,٩٩	٠,٩٨	٠,٩٧	٠,٩٦	٠,٩٥	٠,٩٠	٠,٨٥	٠,٨٠
٠,٧٥	٠,٨٨٢	٠,٧٣٩	٠,٦٧٩	٠,٦٣١	٠,٥٩٠	٠,٥٥٣	٠,٣٩٨	٠,٢٦٢	٠,١٣٢
٠,٧٦	٠,٨٥٥	٠,٧١٢	٠,٦٥٢	٠,٦٠٤	٠,٥٦٣	٠,٥٢٦	٠,٣٧١	٠,٢٣٥	٠,١٠٥
٠,٧٧	٠,٨٢٩	٠,٦٨٦	٠,٦٢٦	٠,٥٧٨	٠,٥٣٧	٠,٥٠٠	٠,٣٤٥	٠,٢٠٩	٠,٠٧٩
٠,٧٨	٠,٨٠٢	٠,٦٥٩	٠,٥٥٩	٠,٥٥١	٠,٥١٠	٠,٤٧٣	٠,٣٨١	٠,١٨٢	٠,٠٥٢
٠,٧٩	٠,٧٧٦	٠,٦٣٣	٠,٥٧٣	٠,٥٢٥	٠,٤٨٤	٠,٤٤٧	٠,٢٩٢	٠,١٥٦	٠,٠٢٦
٠,٨٠	٠,٧٥٠	٠,٦٠٧	٠,٥٤٧	٠,٤٩٩	٠,٤٥٨	٠,٤٢١	٠,٢٦٦	٠,١٣٠	—
٠,٨١	٠,٧٢٤	٠,٥٨١	٠,٥٢١	٠,٤٧٣	٠,٤٣٢	٠,٣٩٥	٠,٢٤٠	٠,١٠٤	—
٠,٨٢	٠,٦٩٨	٠,٥٥٥	٠,٤٩٥	٠,٤٤٧	٠,٤٠٦	٠,٣٦٩	٠,٢١٤	٠,٠٧٨	—
٠,٨٣	٠,٦٧٢	٠,٥٢٩	٠,٤٦٩	٠,٤٢١	٠,٣٨٠	٠,٣٤٣	٠,١٨٨	٠,٠٥٢	—
٠,٨٤	٠,٦٤٦	٠,٥٠٣	٠,٤٤٣	٠,٣٩٥	٠,٣٥٤	٠,٣١٧	٠,١٦٢	٠,٠٢٦	—

(*): الصناعات الكيماوية ومصانع الاسمنت

تابع جدول ٣ ـ ١٠

$\cos\phi_1$*	معامل الضرب لتحسين معامل القدرة إلى: ١,٠٠	٠,٩٩	٠,٩٨	٠,٩٧	٠,٩٦	٠,٩٥	٠,٩٠	٠,٨٥	٠,٨٠
٠,٨٥	٠,٦٢٠	٠,٤٧٧	٠,٤١٧	٠,٣٦٩	٠,٣٢٨	٠,٢٩١	٠,١٣٦	—	—
٠,٨٦	٠,٥٩٢	٠,٤٥٠	٠,٣٩٠	٠,٣٤٢	٠,٣٠١	٠,٢٦٤	٠,١٠٩	—	—
٠,٨٧	٠,٥٦٧	٠,٤٢٤	٠,٣٦٤	٠,٣١٦	٠,٢٧٥	٠,٢٣٨	٠,٠٨٣	—	—
٠,٨٨	٠,٥٤٠	٠,٣٩٧	٠,٣٣٧	٠,٢٨٩	٠,٢٤٨	٠,٢١١	٠,٠٥٦	—	—
٠,٨٩	٠,٥١٢	٠,٣٦٩	٠,٣٠٩	٠,٢٦١	٠,٢٢٠	٠,١٨٣	٠,٠٢٨	—	—
٠,٩٠	٠,٤٨٤	٠,٣٤١	٠,٢٨١	٠,٢٣٣	٠,١٩٢	٠,١٥٥	—	—	—
٠,٩١	٠,٤٥٦	٠,٣١٣	٠,٢٥٣	٠,٢٠٥	٠,١٦٤	٠,١٢٧	—	—	—
٠,٩٢	٠,٤٢٦	٠,٢٨٣	٠,٢٢٣	٠,١٧٥	٠,١٣٤	٠,٠٩٧	—	—	—
٠,٩٣	٠,٣٩٥	٠,٢٥٢	٠,١٩٢	٠,١٤٤	٠,١٠٣	٠,٠٦٦	—	—	—
٠,٩٤	٠,٣٦٣	٠,٢٢٠	٠,١٦٠	٠,١١٢	٠,٠٧١	٠,٠٣٤	—	—	—

(*): أفران القوس الكهربي ومحركات قفص السنجاب الحثية ذات السرعات العالية high speed squirrel-cage motors.

تابع جدول ٣ ـ ١٠

$\cos\phi_1$*	معامل الضرب لتحسين معامل القدرة إلى:								
	١,٠٠	٠,٩٩	٠,٩٨	٠,٩٧	٠,٩٦	٠,٩٥	٠,٩٠	٠,٨٥	٠,٨٠
٠,٩٥	٠,٣٢٩	٠,١٨٦	٠,١٢٦	٠,٠٧٨	٠,٠٣٧	—	—	—	—
٠,٩٦	٠,٢٩٢	٠,١٤٩	٠,٠٨٩	٠,٠٤١	—	—	—	—	—
٠,٩٧	٠,٢٥١	٠,١٠٨	٠,٠٤٨	—	—	—	—	—	—
٠,٩٨	٠,٢٠٣	٠,٠٦٠	—	—	—	—	—	—	—
٠,٩٩	٠,١٤٣	—	—	—	—	—	—	—	—

(٣٦): أحمال الإضاءة ـ المصابيح الحرارية ـ مصابيح الفلورسنت مع وجود المكثف ـ السخانات ذات المقاومة

تحسين معامل القدرة في الصناعة

Power Factor Improvement in Industry

١.٤ مقدمة

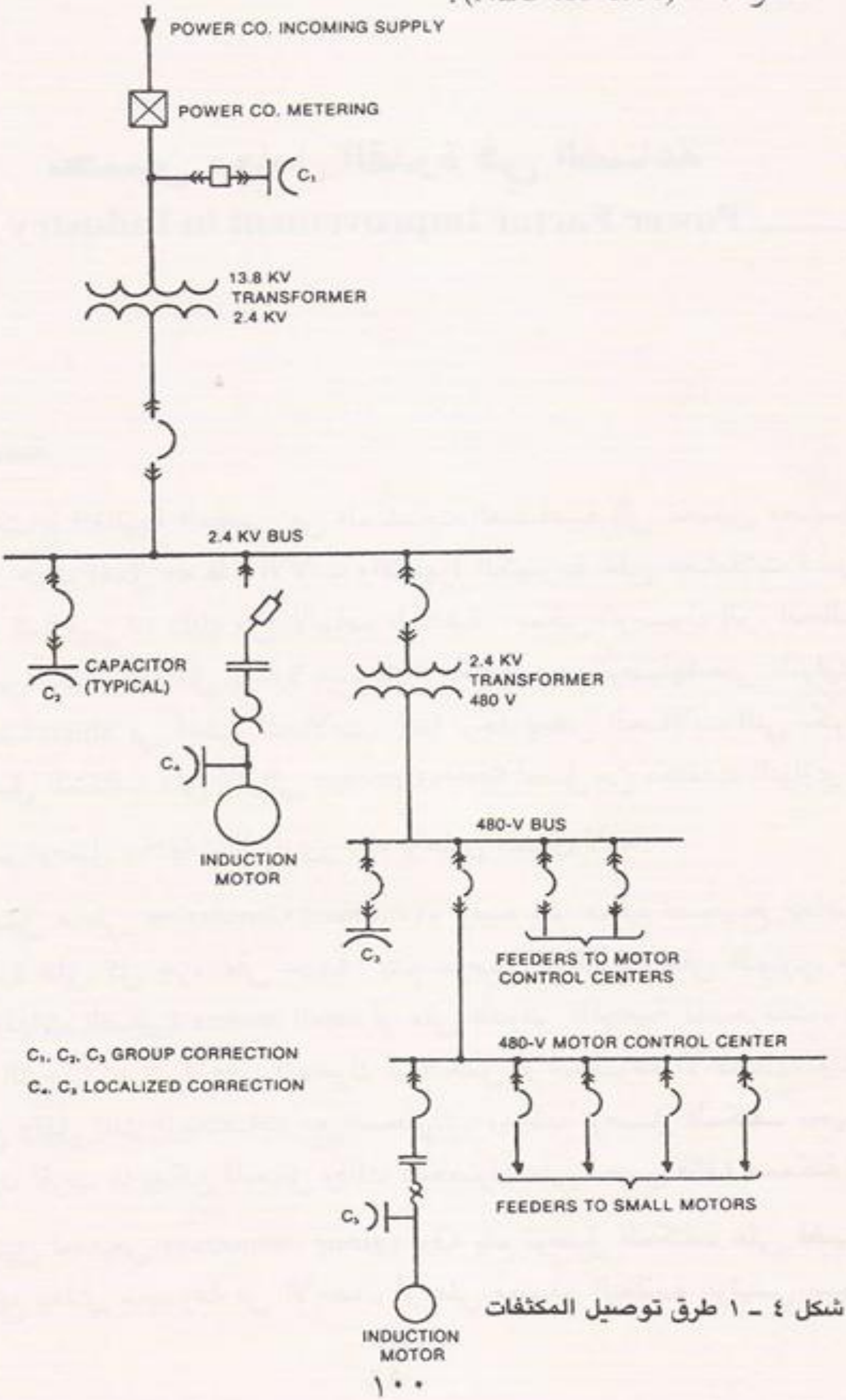
تحتاج الغالبية العظمى من المنشآت الصناعية إلى تحسين معامل القدرة، حيث تعمل معظم الآلات والأجهزة الكهربية على معاملات قدرة منخفضة كما تبين لنا ذلك من الأبواب السابقة. يمكن الوصول إلى الحالة النهائية من تحسين معامل القدرة باستخدام مكثفات يتم توصيلها على التوازي Shunt Capacitors في أغلب الحالات، كما توجد بعض الحالات التي يكون فيها توصيل المكثف على التوالي Series Cpacitor أفضل من مكثفات التوازي.

يتم توصيل مكثفات التوازي عادة بإحدى الطرق لآتية:

١ ـ توصيل محلي Localized Connection، وفيه تتم عملية تصحيح معامل القدرة على كل جزء على حدة. يتم توصيل المكثفات على التوازي مع المغذيات الصغيرة small feeders أو على الدوائر الفرعية للمحركات، أو يتم التوصيل مباشرة على المحرك أو الحمل أو مجموعة الأحمال، ويتم فتح وقفل تلك المكثفات مع المحرك. ويجب توصيل المكثف بحيث يكون أقرب ما يمكن للحمل وذلك للحصول على أحسن فائدة ممكنة.

٢ ـ توصيل تجميعي group connection، وفيه يتم توصيل المكثف على قضيب توزيع يغذي مجموعة من الأحمال أو على مصدر التغذية الرئيسي سواء

على جانب الجهد المنخفض أو على جانب الجهد العالي. يبين الشكل ٤ ـ ١ الطرق العامة في توصيل مكثفات التوازي وذلك تبعاً للمواصفة (NEC-460 1990).



شكل ٤ ـ ١ طرق توصيل المكثفات

إن اختيار الطريقة المناسبة التي يتم بها توصيل المكثف يعتمد على عدة عوامل من أهمها ما يأتي:

١ ـ إقتصاديات التركيب والتشغيل

٢ ـ طبيعة الأحمال (محركات ـ أفران ـ محولات...)

٣ ـ شروط وخطة التشغيل، كأن تعمل مجموعة من الأحمال مثلاً في نفس الوقت أو أن توصل مجموعة من الأحمال المعينة على قضيب توزيع واحد، أو غير ذلك.

سوف نتناول في هذا الباب طرق استخدام المكثفات بالنسبة لأهم الآلات والأجهزة التي تمثل القاسم المشترك في أغلب الصناعات، وهي:

١ ـ المحركات.

٢ ـ المحولات.

٣ ـ أجهزة اللحام

٤ ـ الأفران

٢.٤ تحسين معامل قدرة المحركات

يتراوح مقدار القدرة المردودة للمحركات الحثية بين (٠,٥ ـ ١,٠٠) كيلوڤار لكل كيلووات من قدرة المحرك الفعالة. ويعتمد هذا المقدار على سرعة المحرك ومقنن قدرته بالكيلووات ونسبة تحميله إلى مقنن قدرته. ويمكن ملاحظة الخواص المشتركة الآتية لكل المحركات الحثية:

أ ـ للمحركات التي لها نفس السرعة فإن معامل قدرتها يميل إلى الارتفاع بزيادة مقننات القدرة الفعالة لتلك المحركات. والعكس أيضاً صحيح، حيث يميل معامل القدرة إلى الانخفاض بانخفاض مقنن القدرة الفعالة للمحركات التي لها نفس السرعة.

ب ـ لمحرك معين له مقنن قدرة فعالة فإن معامل القدرة له يميل إلى الانخفاض بانخفاض تحميل المحرك. ويرتفع معامل القدرة بارتفاع التحميل حتى يصل إلى أقصى قيمة له عند مقنن الحمل الكامل.

يعطي الجدول ٤ ـ ١ ـ أ قيماً نمطية لمتوسط القدرة المردودة للمحركات ذات السرعات العالية (١٠٠٠ ـ ٣٠٠٠ لفة/دقيقة)، بينما يعطي الجدول

٤ ـ ١ ـ ب تلك القيم للمحركات ذات السرعات المنخفضة (٣٧٥ ـ ٧٥٠ لفة/دقيقة).

جدول ٤ ـ ١ ـ أ

قيم نمطية للقدرة المردودة من المحركات الحثية (سرعة عالية)

مقنن المحرك	السرعة المقننة (لفة/دقيقة)								
(HP)	٣٠٠٠			١٥٠٠			١٠٠٠		
	القدرة المردودة (ك.ف.أ.ر) عند نسبة مئوية من الحمل الكامل هي:								
	١٠٠	٧٥	٥٠	١٠٠	٧٥	٥٠	١٠٠	٧٥	٥٠
١	٠,٨	٠,٧	٠,٦	٠,٩	٠,٨	٠,٧	١,١	١,١	٠,٨
٢	١,٢	١,١	١,١	١,٥	١,٤	١,٤	١,٥	١,٣	١,٣
٣	١,٧	١,٦	١,٥	٢,١	١,٨	١,٧	٢	٢	٢
٥	٢,٦	٢,٣	٢,١	٣,٢	٢,٨	٢,٥	٣,٢	٢,٩	٢,٧
٧	٣,٣	٢,٨	٢,٥	٤,٣	٣,٧	٣,٦	٤,٣	٣,٩	٣,٦
١٠	٤,٤	٣,٩	٣,٣	٥,٧	٤,٩	٤,٥	٥,٦	٥	٤,٥
١٥	٦,٧	٦	٥,٢	٨,٤	٧	٦	٨,٢	٦,٩	٦,٣
٢٠	٩	٧	٦	١٠	٩	٧	١٠	٨,٨	٧,٨
٣٠	١٣	١٠	٩	١٤	١٢	١١	١٥	١٣	١١
٤٠	١٦	١٤	١٢	١٧	١٦	١٤	١٩	١٦	١٥
٥٠	٢٠	١٧	١٤	٢١	٢٠	١٧	٢٣	١٩	١٧
٦٠	٢٠	١٧	١٦	٢٤	٢٠	١٧	٢٤	٢١	١٩
٧٠	٢١	١٧	١٦	٢٦	٢٢	١٩	٢٧	٢٥	٢٢
٨٠	٢٤	٢٠	١٨	٣٠	٢٤	٢١	٣١	٢٩	٢٥
٩٠	٢٧	٢٢	٢١	٣٣	٣٠	٢٦	٣٧	٣٣	٢٨
١٠٠	٣٠	٢٥	٢٣	٣٧	٣٣	٢٩	٤٤	٣٨	٣٣
١٢٠				٤٤	٣٩	٣٤	٤٧	٤١	٣٤
١٤٠				٤٨	٤٣	٣٧	٥٢	٤٦	٣٨
١٦٠				٥٦	٤٤	٤٠	٥٩	٥٢	٤٢
١٨٠				٦٣	٥٠	٤٥	٦٦	٥٦	٤٧
٢٠٠				٦٣	٥٥	٤٦	٦٨	٥٨	٤٨
٢٢٠				٦٨	٦١	٥٠	٧٥	٦٤	٥٣
٢٥٠				٧٧	٦٩	٥٧	٨٦	٦٨	٥٧

جدول ٤ ـ ١ ـ ب

قيم نمطية للقدرة المردودة من المحركات الحثية (سرعة منخفضة)

مقنن المحرك	السرعة المقننة (لفة/دقيقة)								
(HP)	٧٥٠			٥٠٠			٣٧٥		
	القدرة المردودة (ك.ف.أ.ر) عند نسبة مئوية من الحمل الكامل هي:								
	١٠٠	٧٥	٥٠	١٠٠	٧٥	٥٠	١٠٠	٧٥	٥٠
١	١,٢	١,١	١	١,٥	١,٥	١,٤			
٢	٢,١	٢	١,٩	٢,٨	٢,٨	٢,٥			
٣	٢,٨	٢,٥	٢,٤	٣,٩	٣,٧	٣,٥			
٥	٤,٤	٤,٢	٣,٨	٥,٦	٥,٣	٤,٩			
٧	٥,٦	٥,٥	٥,١	٧,١	٦,٩	٦,٥			
١٠	٧,٤	٧	٦,٧	٨,٦	٧,٥	٦,٦			
١٥	١٠	٩,٧	٨,٧	١٣	١١	١٠			
٢٠	١٢,٤	١١,٩	١٠,٨	١٦	١٤	١٣			
٣٠	١٨	١٧	١٥	٢٢	٢١	١٨			
٤٠	٢١	٢٠	١٨	٢٧	٢٤	٢٠			
٥٠	٢٩	٢٧	٢٢	٣٢	٢٩	٢٥	٣٦	٣٢	٢٨
٦٠	٣٠	٢٨	٢٥	٤٠	٣٥	٣٠	٤١	٣٤	٣١
٧٠	٣٣	٢٨	٢٥	٤٤	٣٧	٣٣	٤٧	٤٠	٣٦
٨٠	٣٧	٣٢	٢٦	٥٠	٤٣	٣٧	٥٣	٤٥	٣٩
٩٠	٤٠	٣٤	٢٩	٥١	٤٤	٣٨	٦٠	٥١	٤٤
١٠٠	٤٤	٣٨	٣٢	٥٧	٤٩	٤٢	٦٢	٥٤	٤٧
١٢٠	٥٣	٤٥	٣٨	٦١	٥٣	٤٥			
١٤٠	٦١	٥٢	٤٢	٧١	٦٢	٥٢			
١٦٠	٦٦	٥٤	٤٧	٨٤	٧٥	٦٢			
١٨٠	٧٠	٥٨	٥١						
٢٠٠	٨٢	٦٨	٥٨						
٢٢٠	٩٠	٧٥	٦٤						
٢٥٠	١٠٣	٨٥	٧٣						

يتم تحسين معامل القدرة في المحركات الحثية عن طريق استخدام مكثفات على التوازي وذلك بإحدى الطرق الآتية:

أ - توصيل فردي على المحرك.
ب - توصيل تجميعي محلي على مجموعة محركات.
حـ - توصيل مركزي على الجهد المنخفض.

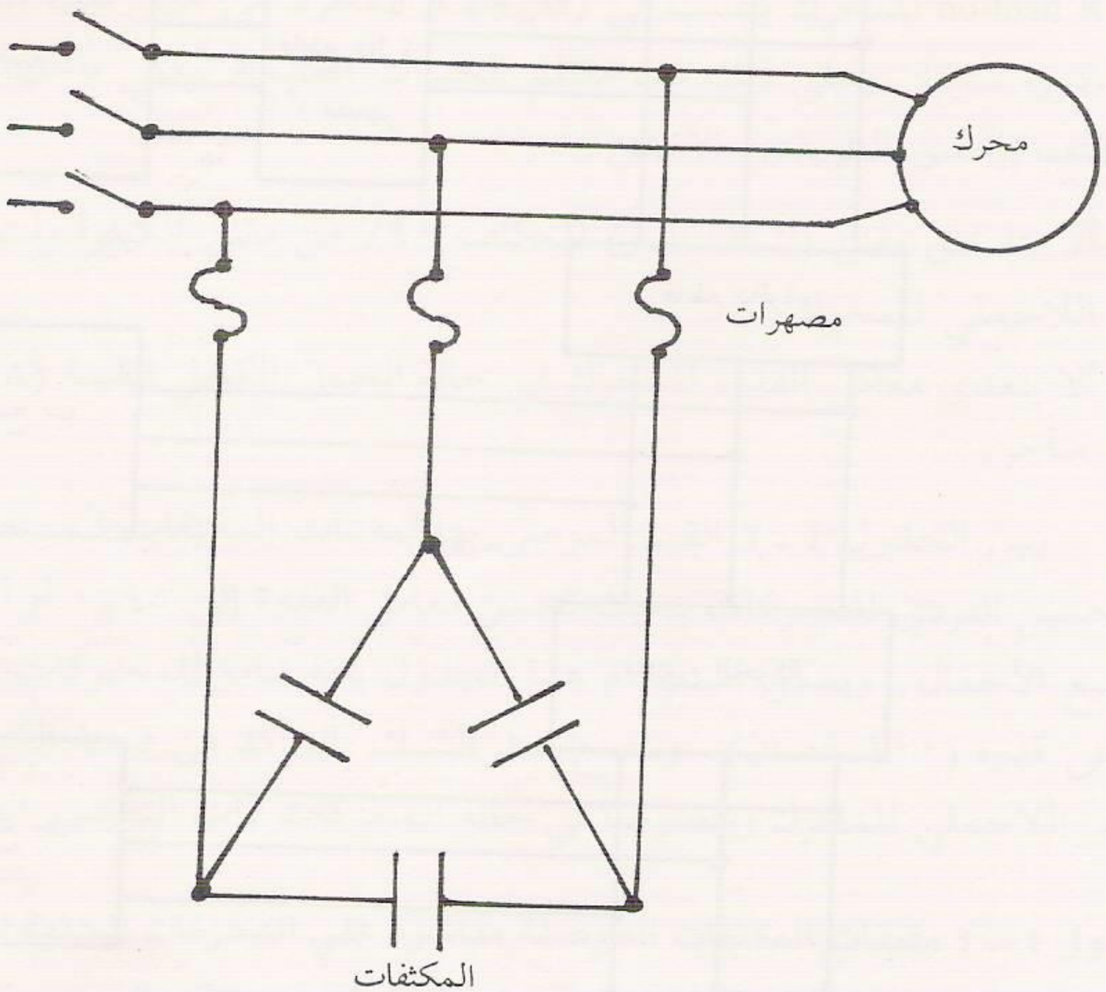
إن اختيار الطريقة الملائمة يجب أن يتم بعد دراسة وافية وتحليل دقيق لجميع العوامل الفنية والاقتصادية التي تتضمن طريقة حساب تكاليف استهلاك الطاقة وكمية الخفض في المفقودات ومقدار زيادة قدرة كيلوڤولت أمبير الشبكة وتحسين الجهد بالإضافة إلى تكاليف تركيب وتشغيل مكثفات تحسين القدرة.

سوف نناقش فيما يلي كل طريقة من الطرق الثلاثة المذكورة بالتفصيل.

٤.٢.١ التوصيل الفردي (التحسين الفردي)

يتم في طريقة التحسين الفردي individual correction توصيل المكثف مباشرة على أطراف المحرك. ويتم توصيل المكثفات الثلاثة عادة على شكل دلتا كما هو مبين بالشكل ٤ - ٢. ويتم استعمال مكثف ذي مقنن كيلوفار ثابت، حيث يكون هذا المكثف مناسباً في جميع حالات تحميل المحرك. إن هذا يرجع إلى أن قيمة القدرة المردوة للمحرك لا تتغير على مدى كبير من اللاحمل إلى الحمل الكامل (راجع جدولي ٤ - ١ - أ و ٤ - ١ - ب). تعطى عملية التوصيل الفردي على المحرك أحسن النتائج من حيث تحسين معامل القدرة، حيث يعمل كل من المحرك والمكثف كوحدة واحدة بحيث يتم توصيلهما على مصدر القدرة أو فصلهما عنه كوحدة واحدة. ويمكن كذلك توصيل المحرك بين مصدر التغذية وباديء الحركة motor starter، كما يمكن توصيل المكثف عند أول مصدر التغذية. يبين الشكل ٤ - ٣ المواضع المختلفة للمكثف.

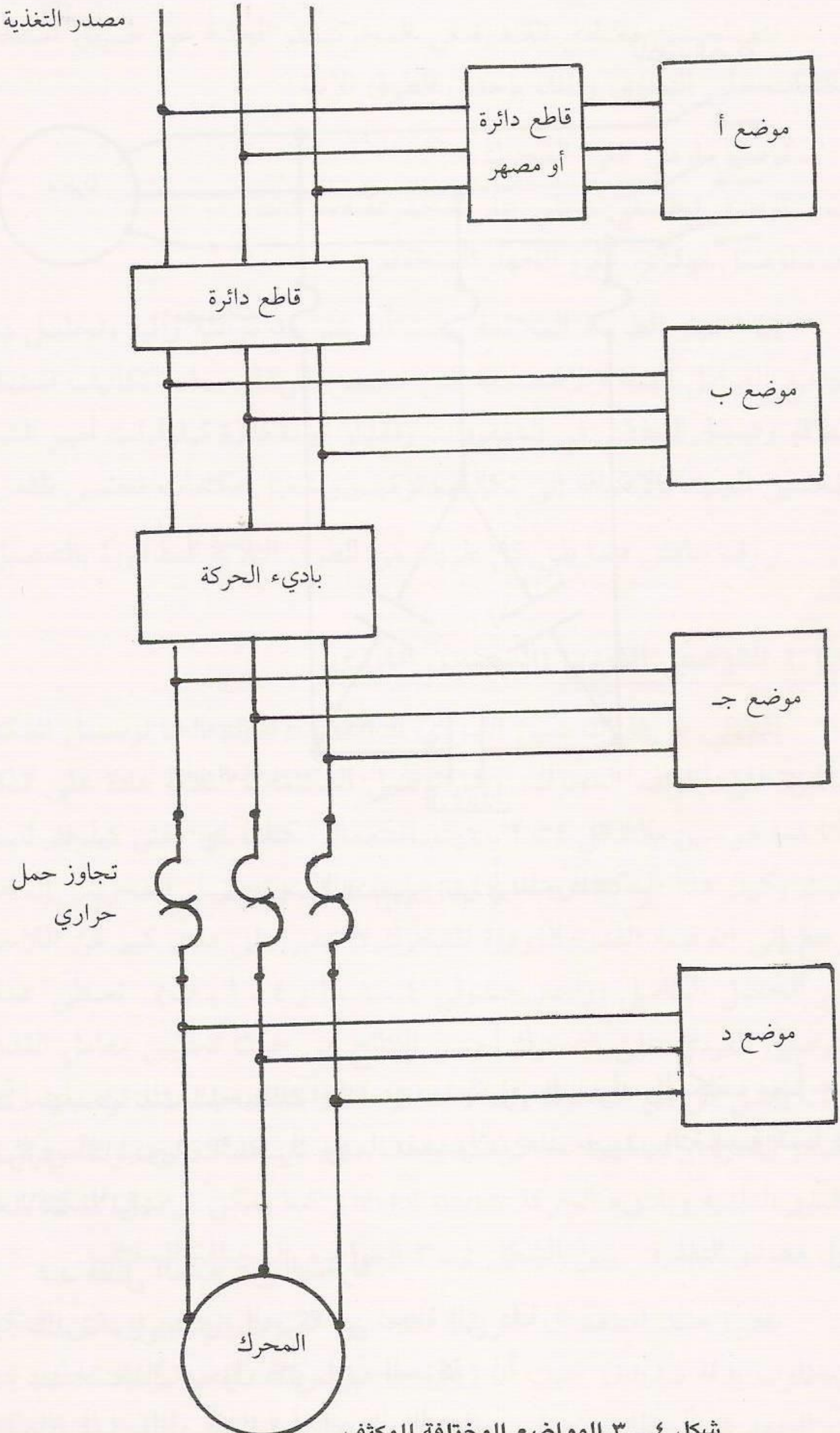
يجب عند استعمال طريقة التحسين الفردي تحديد مقنن المكثف المطلوب بدقة شديدة، حيث أن زيادة حجم المكثف قد ينشأ عنه تجاوز خطير في الجهد في لحظات معينة من التشغيل قد ينتج عنه تدمير المحرك والمكثف



شكل ٤ ـ ٢ التحسين الفردي للمحركات

معاً. تحدث تلك اللحظات عادة عندما يكون المحرك والمكثف معاً على التوازي أثناء دوران المحرك وهما مفصولان عند مصدر التغذية كما في الحالات الآتية:

i - عند فصل المنبع عن المحرك.
ii - عند تحويل باديء الحركة من نجمة إلى دلتا
iii - عند استعمال محول ذاتي لبدء الحركة
iv - عند عمل قاطع الدائرة أو انصهار المصهر.



شكل ٤ ـ ٣ المواضع المختلفة للمكثف

إن اختيار مكثف ذي مقنن أكبر من مقنن الكيلوفولت أمبير اللاحملي no-load KVA للمحرك يتسبب في رفع جهد المحرك في مثل تلك الحالات المذكورة سابقاً. وعلى ذلك فإن معظم الخبرات العالمية توصي باختيار حجم المكثف بإحدى الطريقتين الآتيتين:

١ ـ ألا يتعدى مقنن (ك. ف. أ. ر) للمكثف ٩٠٪ من مقنن الكيلوفولت أمبير اللاحملي للمحرك.
٢ ـ ألا يتعدى معامل القدرة للمحرك في حالة الحمل الكامل القيمة (٠,٩٨) متأخر.

يبين الجدول ٤ ـ ٢ القيم الموصى بها لمقننات المكثفات المستعملة في التحسين الفردي للمحركات بحيث تحسن معامل القدرة إلى ٠,٩٥ أو أكبر عند جميع الأحمال. ويمكن استخدام هذا الجدول بثقة تامة للمحركات العادية وحتى قدرة (١٠٠ حصان). وننصح عند الشك بالتأكد من قيمة الكيلوفولت أمبير اللاحملي للمحرك وخصوصاً في حالة المحركات ذات التصميم الخاص.

جدول ٤ ـ ٢ مقننات المكثفات الموصلة مباشرة على المحركات الحثية لتحسين معامل القدرة إلى ٠,٩٥ على الأقل لجميع الأحمال.

مقنن المحرك	مقنن المكثف بالكيلوفار عند سرعة (لفة/دقيقة):					
(HP)	٣٠٠٠	١٥٠٠	١٠٠٠	٧٥٠	٦٠٠	٥٠٠
٢,٥	٠,٥	١	١	١,٥	١,٥	١,٥
٥	١	١,٥	١,٥	٢,٥	٣	٣
٧,٥	١,٥	٢	٢,٥	٣	٤	٤
١٠	٢,٥	٣	٣	٤	٥	٥
١٢,٥	٣	٣	٤	٥	٦	٦
١٥	٣	٤	٤	٦	٦	٦
١٧,٥	٤	٤	٥	٦	٨	٨
٢٠	٥	٥	٦	٦	٨	١٠
٢٢,٥	٥	٥	٦	٨	٨	١٠
٢٥	٦	٦	٦	٨	١٠	١٢

٢٧,٥	٦	٦	٨	١٠	١٠	١٢
٣٠	٦	٨	٨	١٠	١٢	١٤
٣٢,٥	٦	٨	٨	١٠	١٢	١٤
٣٥	٨	٨	١٠	١٢	١٤	١٤
٣٧,٥	٨	٨	١٠	١٢	١٤	١٦
٤٠	٨	١٠	١٠	١٤	١٤	١٦
٤٢,٥	٨	١٠	١٢	١٤	١٤	١٦
٤٥	٨	١٠	١٢	١٤	١٦	١٨
٤٧,٥	١٠	١٠	١٢	١٤	١٦	١٨
٥٠	١٠	١٢	١٤	١٦	١٨	١٨
٥٥	١٠	١٢	١٤	١٦	١٨	٢٠
٦٠	١٢	١٢	١٤	١٨	٢٠	٢٢
٦٥	١٢	١٤	١٦	١٨	٢٠	٢٤
٧٠	١٢	١٤	١٨	١٨	٢٢	٢٤
٧٥	١٤	١٦	١٨	٢٠	٢٢	٢٦
٨٠	١٤	١٦	٢٠	٢٠	٢٤	٢٨
٨٥	١٤	١٨	٢٠	٢٢	٢٤	٢٨
٩٠	١٦	٢٠	٢٢	٢٤	٢٦	٣٠
٩٥	١٦	٢٠	٢٤	٢٤	٢٨	٣٠
١٠٠	١٨	٢٢	٢٤	٢٦	٢٨	٣٢
١٠٥	١٨	٢٢	٢٤	٢٦	٣٠	٣٢
١١٠	١٨	٢٤	٢٦	٢٨	٣٠	٣٤
١١٥	٢٠	٢٤	٢٦	٢٨	٣٢	٣٤
١٢٠	٢٠	٢٦	٢٦	٢٨	٣٢	٣٦
١٢٥	٢٢	٢٦	٢٨	٣٠	٣٤	٣٦
١٣٠	٢٢	٢٦	٢٨	٣٠	٣٤	٣٨
١٣٥	٢٤	٢٨	٢٨	٣٠	٣٤	٣٨
١٤٠	٢٤	٢٨	٣٠	٣٢	٣٦	٤٠
١٤٥	٢٦	٢٨	٣٠	٣٢	٣٦	٤٠
١٥٠	٢٦	٢٨	٣٠	٣٢	٣٦	٤٢
١٥٥	٢٦	٣٠	٣٠	٣٤	٣٨	٤٤
١٦٠	٢٨	٣٠	٣٢	٣٤	٣٨	٤٦
١٦٥	٢٨	٣٠	٣٢	٣٦	٤٠	٤٨
١٧٠	٣٠	٣٢	٣٢	٣٦	٤٠	٤٨
١٧٥	٣٠	٣٢	٣٤	٣٨	٤٢	٥٠

١٨٠	٣٠	٣٤	٣٤	٣٨	٤٤	٥٠
١٨٥	٣٠	٣٤	٣٤	٣٨	٤٤	٥٢
١٩٠	٣٢	٣٤	٣٦	٤٠	٤٦	٥٢
١٩٥	٣٢	٣٤	٣٦	٤٢	٤٦	٥٤
٢٠٠	٣٢	٣٦	٣٦	٤٤	٤٦	٥٤
٢٠٥	٣٢	٣٦	٣٨	٤٤	٤٨	٥٦
٢١٠	٣٤	٣٦	٣٨	٤٦	٤٨	٥٨
٢١٥	٣٤	٣٦	٣٨	٤٦	٥٠	٥٨
٢٢٠	٣٤	٣٦	٣٨	٤٨	٥٠	٦٠
٢٢٥	٣٦	٣٨	٤٠	٤٨	٥٢	٦٢
٢٣٠	٣٦	٣٨	٤٠	٥٠	٥٢	٦٢
٢٣٥	٣٦	٤٠	٤٢	٥٠	٥٤	٦٤
٢٤٠	٣٨	٤٠	٤٢	٥٢	٥٦	٦٦
٢٤٥	٣٨	٤٠	٤٢	٥٢	٥٦	٦٦
٢٥٠	٤٠	٤٢	٤٤	٥٤	٥٨	٦٨

يعطي الجدول ٤ ـ ٣ مقننات المكثفات المستعملة لتحسين معامل قدرة المحركات الحثية التي تعمل على تردد ٦٠ هرتز مع النسبة المئوية في خفض التيار Ampere Reduction (AR) والتي تعطى بالعلاقة :

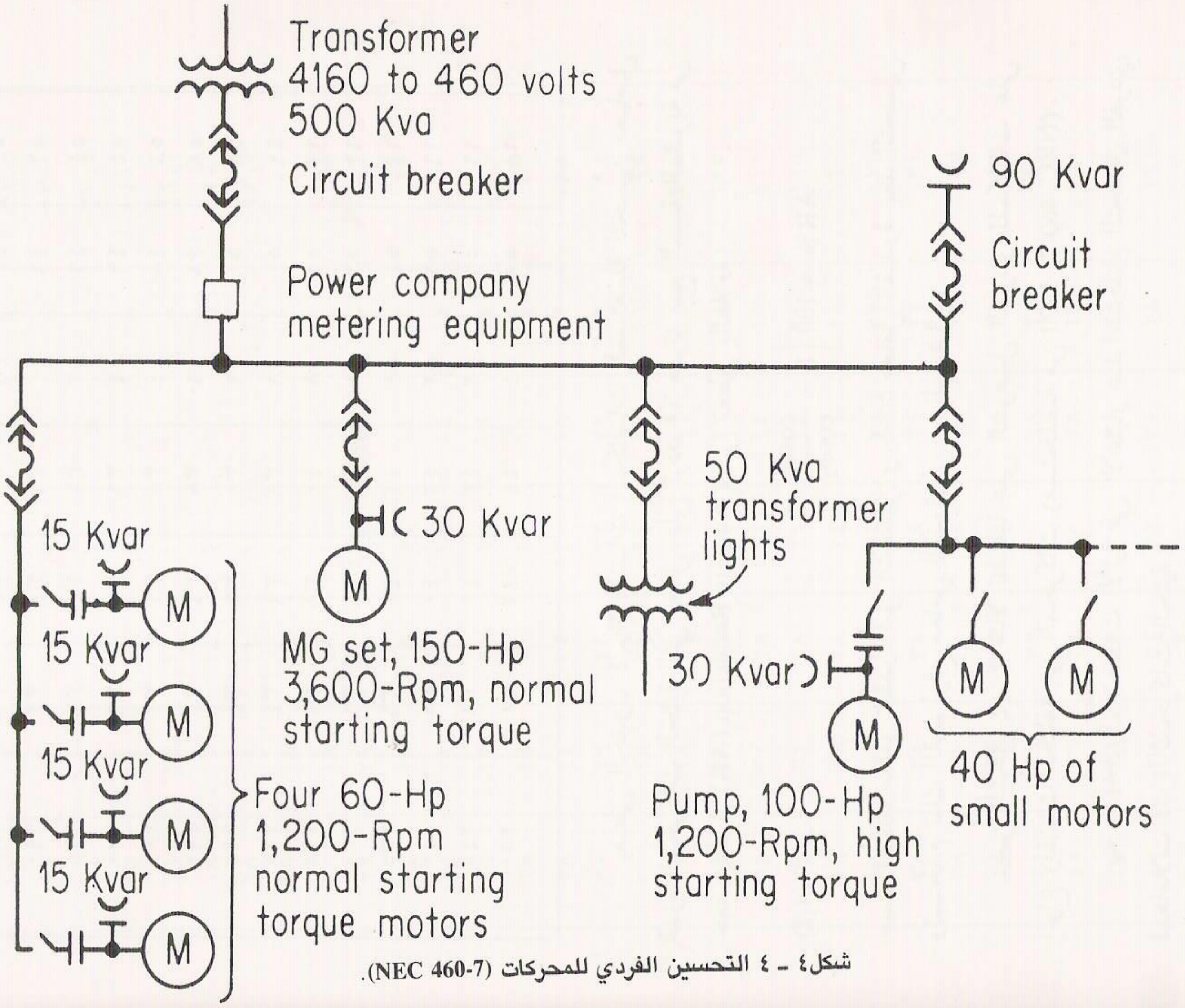
$$AR\% = 100 \left\{ 1 - \frac{\cos\phi_1}{\cos\phi_2} \right\} \quad \text{.......} \quad (4.1)$$

حيث $\cos\phi 1$ معامل القدرة قبل التحسين و $\cos\phi_2$ معامل القدرة بعد التحسين وتستخدم تلك القيم لرفع معامل القدرة إلى حوالي ٠,٩٥ .

يبين الشكل ٤ ـ ٤ مثالاً تطبيقياً على التوصيل الفردي للمكثفات على أنواع ومقننات مختلفة من المحركات (مستخلصة من NEC 460-7, 1990) .

يجب أخذ الملاحظات الآتية في الاعتبار عند استخدام التحسين الفردي لمعاملات قدرة المحركات الحثية :

١ ـ إن التحسين الفردي يكون مناسباً في حالات التشغيل المستمر على حمل ثابت تقريباً، وذلك بالنسبة لكل محرك على حدة .



شكل٤ ـ ٤ التحسين الفردي للمحركات (NEC 460-7).

جدول ٤ ـ ٣ مقننات المكثفات لتحسين معامل قدرة المحركات (٦٠ هرتز)*

مقنن المحرك HP	سرعة المحرك المقننة (لفة/دقيقة) ٣٦٠٠: مقنن المكثف ك.ف.أ.ر	٣٦٠٠: نسبة خفض التيار	١٨٠٠: مقنن المكثف ك.ف.أ.ر	١٨٠٠: نسبة خفض التيار	١٢٠٠: مقنن المكثف ك.ف.أ.ر	١٢٠٠: نسبة خفض التيار	٩٠٠: مقنن المكثف ك.ف.أ.ر	٩٠٠: نسبة خفض التيار	٧٢٠: مقنن المكثف ك.ف.أ.ر	٧٢٠: نسبة خفض التيار	٦٠٠: مقنن المكثف ك.ف.أ.ر	٦٠٠: نسبة خفض التيار
٣	١,٥	١٤	١,٥	١٥	١,٥	٢٠	٢	٢٧	٢,٥	٣٥	٣,٥	٤١
٥	٢	١٢	٢	١٣	٢	١٧	٣	٢٥	٤	٣٢	٤,٥	٣٧
٧,٥	٢,٥	١١	٢,٥	١٢	٣	١٥	٤	٢٢	٥,٥	٣٠	٦	٣٤
١٠	٣	١٠	٣	١١	٣,٥	١٤	٥	٢١	٦,٥	٢٧	٧,٥	٣١
١٥	٤	٩	٤	١٠	٥	١٣	٦,٥	١٨	٨	٢٣	٩,٥	٢٧
٢٠	٥	٩	٥	١٠	٦,٥	١٢	٧,٥	١٦	٩	٢١	١٢	٢٥
٢٥	٦	٩	٦	١٠	٧,٥	١١	٩	١٥	١١	٢٠	١٤	٢٣
٣٠	٧	٨	٧	٩	٩	١١	١٠	١٤	١٢	١٨	١٦	٢٢
٤٠	٩	٨	٩	٩	١١	١٠	١٢	١٣	١٥	١٦	٢٠	٢٠
٥٠	١٢	٨	١١	٩	١٣	١٠	١٥	١٢	١٩	١٥	٢٤	١٩
٦٠	١٤	٨	١٤	٨	١٥	١٠	١٨	١١	٢٢	١٥	٢٧	١٩
٧٥	١٧	٨	١٦	٨	١٨	١٠	٢١	١٠	٢٦	١٤	٣٢,٥	١٨
١٠٠	٢٢	٨	٢١	٨	٢٥	٩	٢٧	١٠	٣٢,٥	١٣	٤٠	١٧
١٢٥	٢٧	٨	٢٦	٨	٣٠	٩	٣٢,٥	١٠	٤٠	١٣	٤٧,٥	١٦
١٥٠	٣٢,٥	٨	٣٠	٨	٣٥	٩	٣٧,٥	١٠	٤٧,٥	١٢	٥٢,٥	١٥
٢٠٠	٤٠	٨	٣٧,٥	٨	٤٢,٥	٩	٤٧,٥	١٠	٦٠	١٢	٦٥	١٤
٢٥٠	٥٠	٨	٤٥	٧	٥٢,٥	٨	٥٧,٥	٩	٧٠	١١	٧٧,٥	١٣
٣٠٠	٥٧,٥	٨	٥٢,٥	٧	٦٠	٨	٦٥	٩	٨٠	١١	٨٧,٥	١٢
٣٥٠	٦٥	٨	٦٠	٧	٦٧,٥	٨	٧٥	٩	٨٧,٥	١٠	٩٥	١١
٤٠٠	٧٠	٨	٦٥	٦	٧٥	٨	٨٥	٩	٩٥	١٠	١٠٥	١١
٤٥٠	٧٥	٨	٦٧,٥	٦	٨٠	٨	٩٢,٥	٩	١٠٠	٩	١١٠	١١
٥٠٠	٧٧,٥	٨	٧٢,٥	٦	٨٢,٥	٨	٩٧,٥	٩	١٠٧,٥	٩	١١٥	١٠

(*) 60Hz NEMA Class B

٢ ـ لا يُفضل استخدام التحسين الفردي في حالات المحركات التي تعمل على أحمال متقطعة (كمحركات الأوناش مثلاً)، ولا في حالات المحركات التي تتعرض لعمليات عكس الحركة. وعند الضرورة لاستخدام التحسين

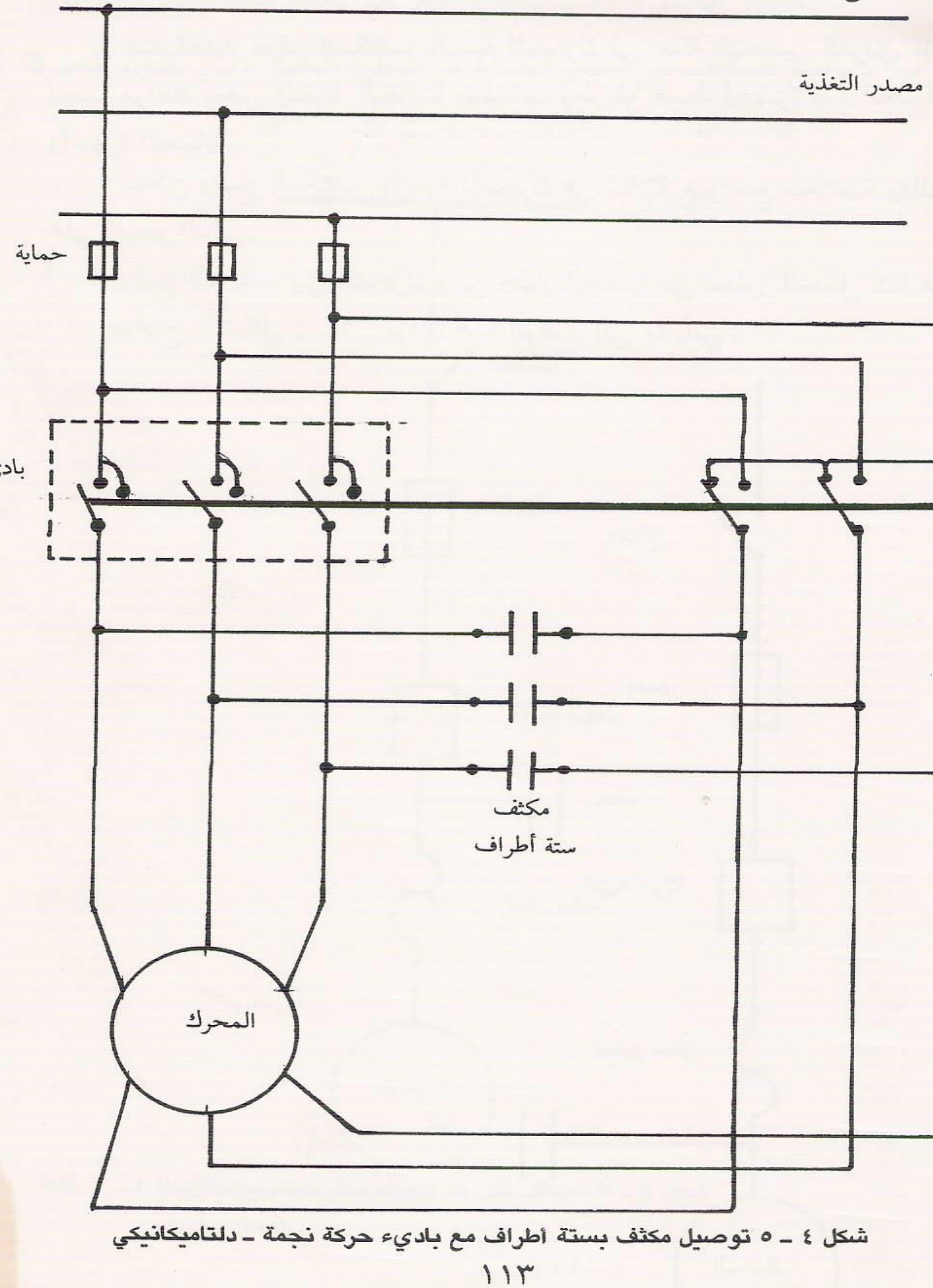
الفردي فيجب ألا يزيد مقنن كيلوڤار المكثف عن هذا الذي يستخدم للقدرة المستمرة للمحرك، حيث تكون قدرة المحرك المستمرة أقل بكثير من قدرته المتقطعة. ويجب استشارة مصنع المحركات بهذا الشأن.

٣ ـ يجب الاحتياط جيداً عند استخدام التحسين الفردي لمحركات ذات فرملة تعمل بفقد الجهد، حيث يلزم استخدام نظام تحكم وفصل بحيث يتم عزل المحرك والفرملة تماماً عن المكثف في وضع السكون. كما يجب عمل الاحتياطات اللازمة عند وجود أجهزة تحكم الكترونية موصلة مع المحرك حتى لا تتعرض تلك الأجهزة إلى التدمير بسبب ارتفاع الجهد عند خفض الحمل أو فصله.

٤ ـ إن تأثير وضع المكثف في تحسين معامل القدرة وخفض تيار التغذية يبدأ من موضع المكثف ويتجه نحو مصدر التغذية وليس نحو الحمل، وعلى ذلك فإن وضع المكثف أقرب ما يمكن من المحرك يقلل الفقد في الدائرة بين الحمل وأجهزة القياس كما يخفف من الحمل على محول التوزيع. كما أن وضع المكثف بجوار المحرك يرفع من الجهد مما يؤدي إلى أداء أفضل للمحرك. إلا أن الخطر الأساسي من تلك الطريقة هو أن يزيد الارتفاع في الجهد عن الحدود المسموح بها في حالة الأحمال الخفيفة، حيث يقل تأثير تيار الحمل الحثي بينما يزيد تيار المكثف السعوي (أو يظل كما هو على وجه التقريب)، حيث يعتمد تيار المكثف أساساً على جهد نقطة التوصيل.

٥ ـ تستخدم المكثفات عادة على هيئة دلتا في المحركات سواء في لحظة البدء starting أو بعد التشغيل، وذلك عند استخدام باديء حركة نجمة دلتا. ويمكن توصيل المكثفات على شكل نجمة عند بدء الحركة ثم تحويلها بعد ذلك إلى دلتا مع المحرك. وتستخدم تلك الطريقة عندما يكون معامل القدرة للمحرك منخفضاً نسبياً بحيث أن الحاجة تدعو إلى استخدام أقصى كيلوڤار للمكثف عند التشغيل. تسمى توصيلة الدلتا للمكثف توصيلة بثلاثة أطراف three-terminal capacitor، بينما تسمى توصيلة النجمة توصيلة بستة أطراف six-terminal capacitor. ويجب مراعاة أنه إذا كان المحرك مزوداً بباديء حركة نجمة ـ دلتا تلقائي العمل فيمكن توصيل المكثفات بطريقة

طبيعية. أما إذا كان باديء الحركة من النـوع الميكانيكي فيجب استعمـال مكثفـات خاصـة لهذا الغـرض، حيث تكون تلك المكثفـات موصلة على شكل نجمة عند بدء الحركة مما يعرضها لجهود أكبـر. يبين الشكل ٤ ـ ٥



شكل ٤ ـ ٥ توصيل مكثف بستة أطراف مع باديء حركة نجمة ـ دلتاميكانيكي

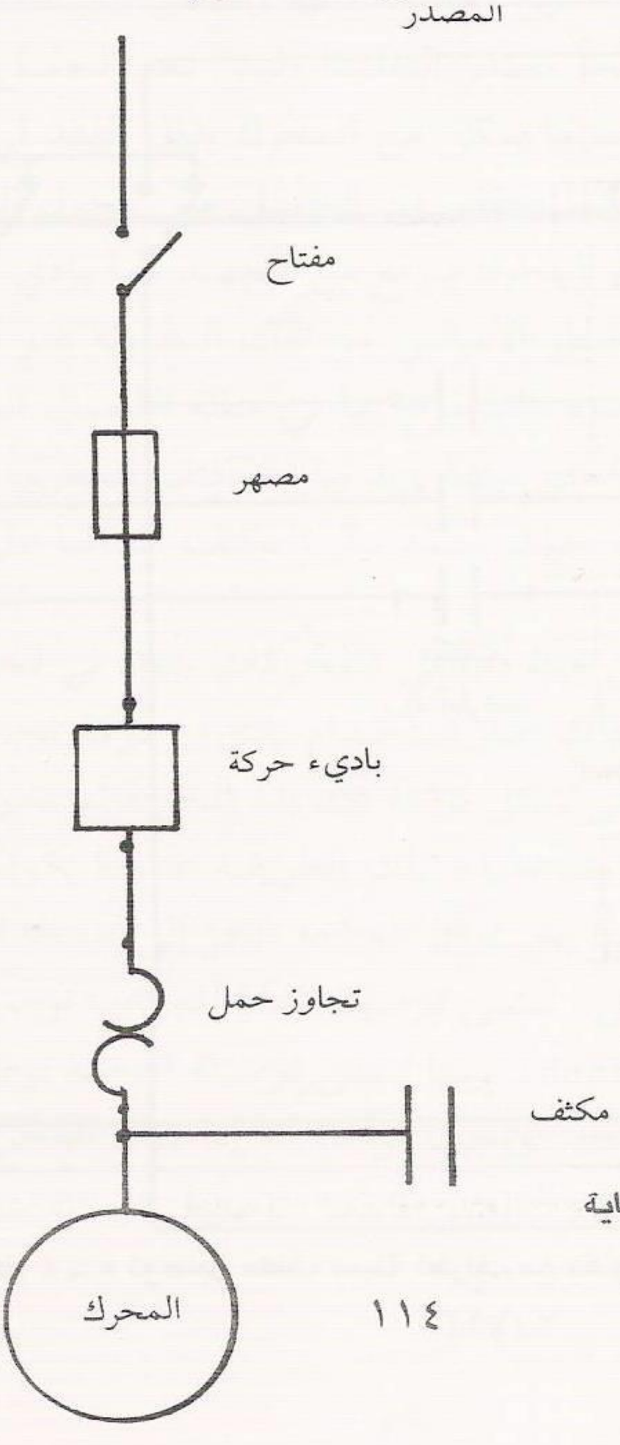
توصيلة المكثفات باستخدام باديء حركة نجمة ـ دلتا ميكانيكي . ويمكن استعمال تلك المكثفات بعد ذلك لأي توصيل.

موقع المكثف

عند اختيار موقع المكثف بالنسبة للمحرك في حالة التحسين الفردي فإنه يجب مراعاة بعض النقاط الخاصة بمقننات وطريقة ضبط أجهزة بدء الحركة وأجهزة الحماية.

يمكن وضع المكثف بالنسبة للمحرك في ثلاثة مواضع مختلفة وذلك على النحو التالي :

أ - يوضع المكثف بين المحرك وبين جهاز الحماية من تجاوز الحمل كما هو موضح بالشكل ٤ ـ ٦. يؤدي هذا الوضع إلى ما يأتي :

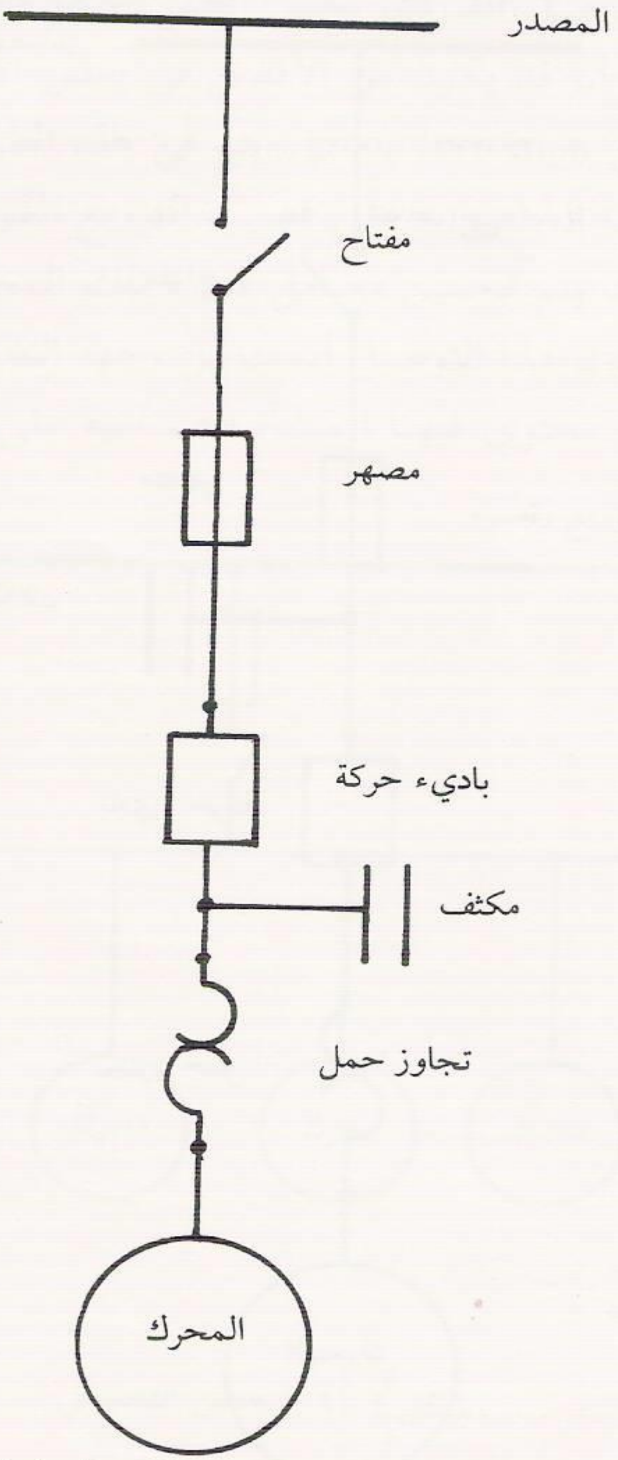


شكل ٤ ـ ٦ المكثف بين المحرك وحماية تجاوز الحمل.

i - يعتمد حجم المكثف على تيار مغنطة المحرك.

ii - ينخفض تيار بادىء الحركة وكذلك التيار المار في جهاز الحماية من تجاوز الحمل، بحيث يحتاج الأمر إلى إعادة ضبط جهاز الحماية.

ب ـ يوضع المكثف بين جهاز الحماية من تجاوز الحمل وبين باديء الحركة كما في شكل ٤ ـ ٧. يؤدي هذا الوضع إلى ما يأتي:



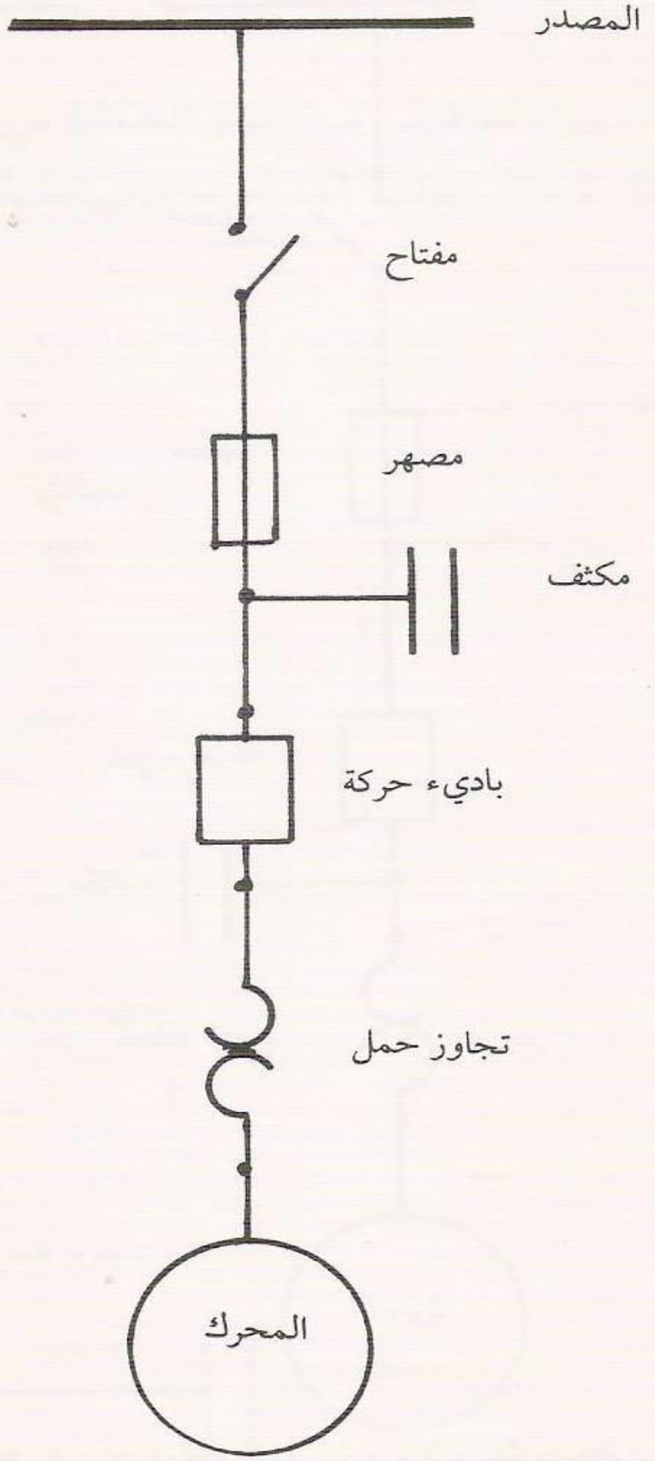
شكل ٤ ـ ٧ المكثف بين باديء الحركة وتجاوز الحمل.

i - يعتمد حجم المكثف على تيار مغنطة المحرك.

ii - ينخفض تيار باديء الحركة.

iii - لا يتغير تيار جهاز حماية تجاوز الحمل ولا يحتاج الجهاز بذلك إلى عملية إعادة الضبط.

حـ - يوضع المكثف قبل باديء الحركة من ناحية مصدر التغذية كما في شكل ٤ ـ ٨. يؤدي هذا الوضع إلى ما يأتي:



شكل ٤ ـ ٨ المكثف بين مصدر التغذية وباديء الحركة.

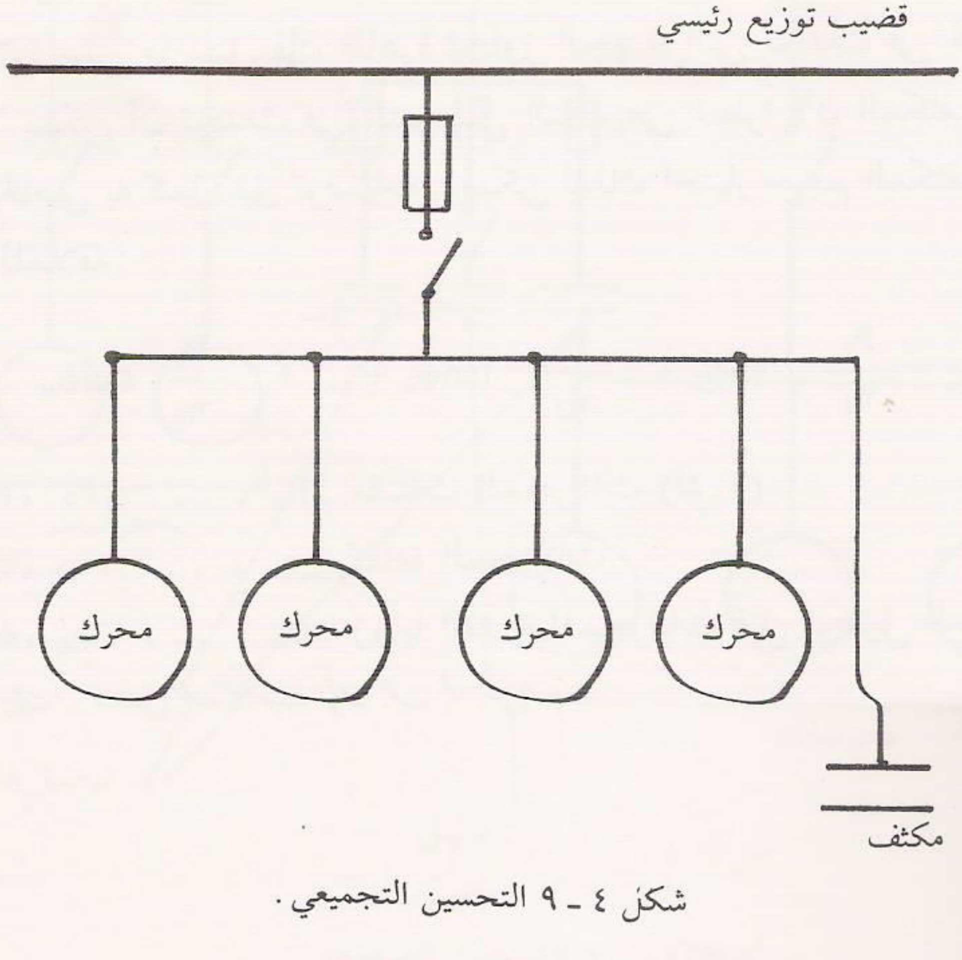
i - لا يعتمد حجم المكثف على تيار مغنطة المحرك .

ii - لا يتغير تيار باديء الحركة .

iii - لا يتغير تيار جهاز حماية تجاوز الحمل ، ولا يحتاج الجهاز بذلك إلى إعادة ضبط .

٤.٢.٢ التوصيل التجميعي

رغم أن التوصيل الفردي يحقق أقصى استفادة من عملية التحسين في معامل القدرة ، إلا أنه قد يكون من الأفضل في بعض الأحيان استخدام طريقة التحسين التجميعي group correction . يتم في هذه الطريقة توصيل المكثف بملامسه Contactor الخاص به على قضيب التوزيع الموصل عليه مجموعة من المحركات ، حيث يتم تحسين معامل قدرة تلك المحركات معاً كما في الشكل ٤ ـ ٩ . يكون هذا التوصيل أنسب من وجهة النظر الهندسية والاقتصادية في الحالات التي تحتوي فيها المنشأة الصناعية على عدد من المحركات



شكل ٤ ـ ٩ التحسين التجميعي .

الصغيرة، حيث يكون من الأفضل تجميع مجموعة تلك المحركات وتحسين معامل القدرة لها معاً. ويتم اللجوء إلى ذلك عندما يكون من غير المناسب إيجاد مكثف ذي مقنن مناسب لكل محرك على حدة.

نجد أيضاً أن كثيراً من المنشآت الصناعية لا تعمل دائماً على نفس الحمل الموصل Connected load في نفس الوقت (الحمل الموصل هو مجموع مقننات جميع أحمال المنشأة لو عملت كلها في نفس الوقت)، وعلى العكس من ذلك فإن أغلب المنشآت تعمل على أقصى طلب maximum demand يساوي ٦٠٪ من الحمل الموصل على وجه التقريب (أي على معامل طلب de-mand factor يساوي ٦٠٪)، بينما تكون ٤٠٪ من الأحمال متوقفة أو احتياطية. معنى ذلك أن توصيل مكثف على قضيب التوزيع الرئيسي لمجموعة الأحمال العاملة فعلاً (٦٠٪ من الحمل الموصل) يحقق نسبة توفير اقتصادية عالية (حوالي ٤٠٪) في سعر المكثف المطلوب فيما لو تم توصيل كل محرك بالمكثف الخاص به.

علاوة على ما سبق فإن ظاهرة تجاوز الجهد التي تحدث في التوصيل الفردي لا يمكن أن تحدث في التوصيل التجميعي نظراً لأن المكثف متصل بمفتاحه الخاص به كما سبق توضيحه. يمكن لذلك اختيار حجم المكثف بحرية أكبر تبعاً للعلاقة:

$$Q_C = \frac{P_1}{\eta_1} \tan\phi_1 + \frac{P_2}{\eta_2} \tan\phi_2 + \ldots + \frac{P_n}{\eta_n} \tan\phi_n$$

حيث: P_1، P_2، . . . ، P_n: مقننات المحركات (ك. و)

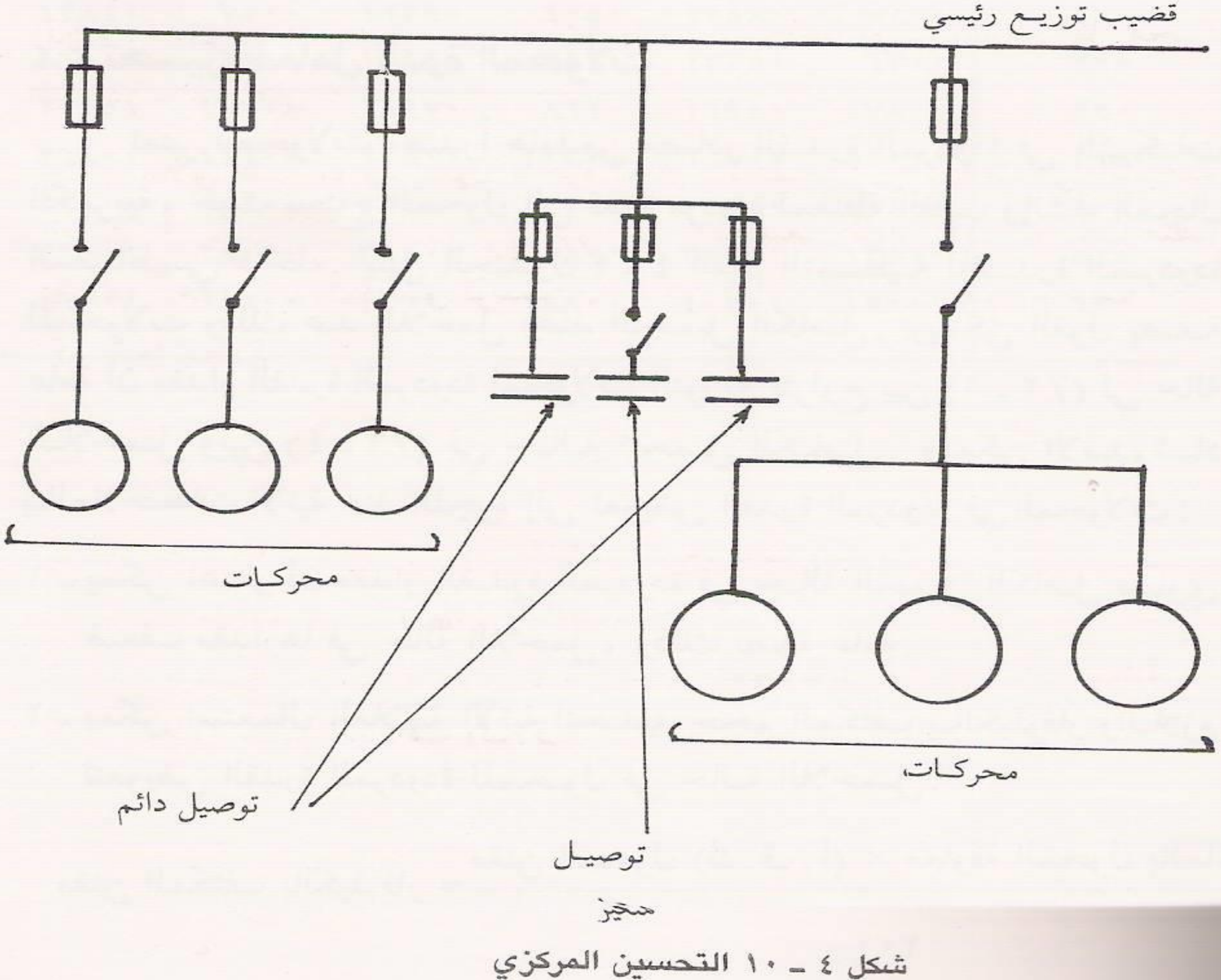
η_1، η_2، . . . ، η_n: كفاءة المحركات

ϕ_1، ϕ_2، . . . ، ϕ_n: زوايا القدرة للمحركات قبل توصيل المكثف

Q_C: مقنن المكثف (ك. ف. أ. ر).

٣.٢.٤ التوصيل المركزي

التوصيل أو التحسين المركزي centralized correction هو عملية التحكم في القدرة المردودة عن طريق توصيل المكثف على لوحات التوزيع مباشرة وذلك على جانب الجهد المنخفض كما هو مبين بالشكل ٤ ـ ١٠. ويتكون المكثف عادة من مجموعة ثابتة من المكثفات تظل موصلة دائماً بصرف النظر عن مقدار الحمل، ومجموعة أخرى يتم توصيلها على الدائرة أو فصلها بطريقة ذاتية على خطوات، حيث يتم المحافظة على معامل القدرة الكلي في حدود (٠,٩٧). يمكن بهذه الطريقة تجنب ارتفاعات الجهد في فترات اللاحمل أو الأحمال الخفيفة.



شكل ٤ ـ ١٠ التحسين المركزي

تغذى المكثفات الدائمة الشبكة بكمية من القدرة المردودة وذلك بصفة دائمة. أما المكثفات المتحكم فيها ذاتياً فإنها تُزوَّد بمنظم متحكم في القدرة المردودة بحيث يعمل على فصل أو توصيل مجموعة المكثفات على خطوات في حدود (٥٠ - ١٠٠ ك. ف. ا. ر) للخطوة الواحدة. وتوجد أنواع مختلفة من أجهزة التحكم المستعملة في مجالات الصناعة تكون حساسة لأحد متغيرات التشغيل (الجهد - التيار - الكيلوفار). كما يوجد بعض الأنواع التي تعمل تبعاً للزمن. وعلى المهندس دراسة واختيار الطريقة الأنسب لظروف التشغيل.

إن اللجوء إلى التحسين المركزي يكون مفيداً عند وجود أعداد كبيرة من الأحمال أو عندما تكون دورة الحمل حادة التغيرات بحيث يلزم فصل المكثفات أو توصيلها تبعاً لقيمة الحمل.

٣.٤ تحسين معامل قدرة المحولات

تُعتبر المحولات مصدراً هاماً من مصادر القدرة المردودة في الشبكات الكهربية، حيث يحتاج المحول إلى قدرة مردودة لمغنطة القلب وإنشاء المجال المغناطيسي داخله. يبين الجدول ٤ - ٤ القيم النمطية للقدرة المردودة للمحولات وذلك عند اللاحمل وعند التحميل الكامل. ويمكن القول بصفة عامة أن مقدار القدرة المردودة لمحولات التوزيع يتراوح بين (١ - ٢٪) في حالة اللاحمل وبين (٤ - ٦٪) في حالة الحمل الكامل. ويمكن الاسترشاد بالملاحظات الآتية عند اللجوء إلى تعويض القدرة المردودة في المحولات:

١ - يمكن اعتبار أن مقدار القدرة المردودة في حالة الحمل الكامل يساوي ضعف مقدارها في حالة اللاحمل، وذلك بصفة عامة.

٢ - يمكن استعمال العلاقة الآتية لتحديد حجم المكثف بالكيلوفار واللازم لتعويض القدرة المردودة للمحول في حالة اللاحمل:

$$\text{مقنن المكثف بالكيلوفار} = \frac{\text{مقنن المحول (ك. ف. أ)} \times \text{معاوقة المحول بالمائة}}{٢٠٠}$$

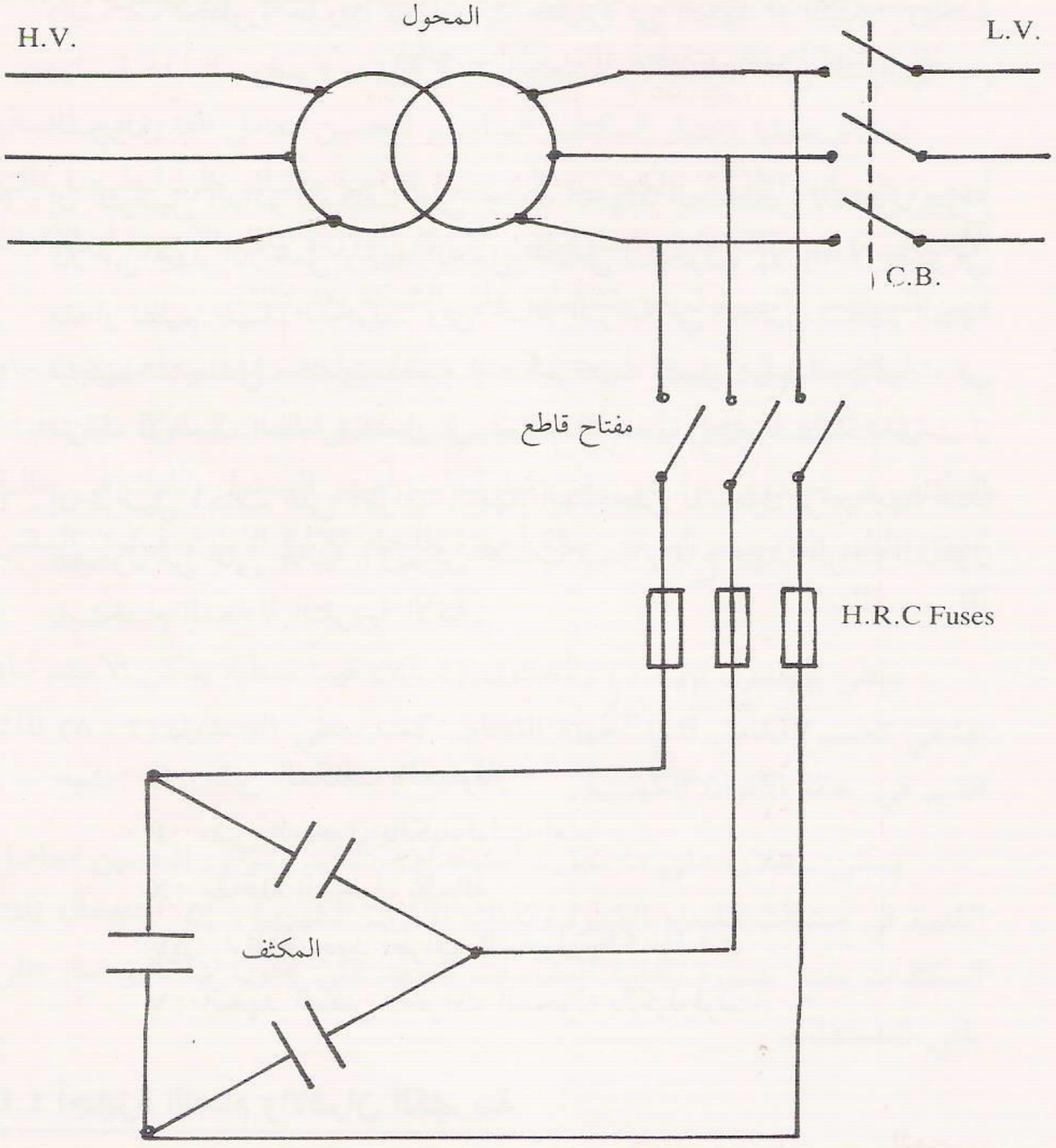
جدول ٤ ـ ٤ القدرة المردودة في محولات التوزيع (ڤ.أ.ر)

المقنن ك.ڤ.أ	٢٣/١٧,٥/١٢/٧,٢ ك.ڤ.		٢٤ ك.ڤ.		٣٦ ك.ڤ.	
	لا حمل	حمل كامل	لا حمل	حمل كامل	لا حمل	حمل كامل
١٦	١٠٨٠	١٣٦٠	—	—	—	—
٢٥	١٥٠٠	٢١٣٠	١٧٤٠	٢٤٧٠	١٩٥٠	٢٩٨٠
٤٠	٢٠٢٠	٣١٧٠	٢٣٢٠	٣٦٨٠	٢٥٢٠	٣٨٨٠
٦٣	٢٥٠٠	٤٤٦٠	٣٠٢٠	٥٣٠٠	٣٤٨٠	٥٧٦٠
٨٠	٢٧٦٠	٥٣٤٠	٣٥٦٠	٦٥٤٠	٤٢٨٠	٧٢٦٠
١٠٠	٣٦٠٠	٦٩٢٠	٤١٦٠	٧٩٦٠	٥٠٨٠	٨٨٨٠
١٢٥	٤٥٠٠	٨٧٦٠	٥٠٠٠	٩٨٦٠	٦١٤٠	١١٠٠٠
١٦٠	٥٠٠٠	١٠٥٨٠	٦٠٥٠	١٢٣٩٠	٧٥٠٠	١٣٨٤٠
٢٠٠	٦٣٠٠	١٣٥٥٠	٧١٦٠	١٥١٦٠	٨٩٠٠	١٦٩٠٠
٢٥٠	٧٨٠٠	١٦٩٥٠	٨٦٢٠	١٨٩٧٠	١٠٧٠٠	٢١٠٥٠
٣١٥	١٠٠٠٠	٢١٧٠٠	١٠٣٠٠	٢٣٨٠٠	١٢٦٠٠	٢٦١٠٠
٤٠٠	١٠٨٠٠	٢٥٧٠٠	١٣٢٠٠	٣٠٠٠٠	١٥٢٠٠	٣٢٠٠٠
٥٠٠	١٣٥٠٠	٣٢٣٠٠	١٥٨٠٠	٣٦٨٠٠	١٨٠٠٠	٣٩٠٠٠
٦٣٠	١٧٠٠٠	٤٠٧٠٠	١٨٨٠٠	٤٣٦٠٠	٢١٢٠٠	٤٦٠٠٠

جدول ٤ ـ ٥ مقننات المكثفات للتوصيل المباشر على المحول

مقنن المحول ك.ڤ.أ	مقنن المكثف (ك.ڤ.أ.ر) عند جهد ٥/١٠ ك.ڤ	١٥/٢٠ ك.ڤ	٢٥/٣٠ ك.ڤ
٢٥	٢	٢,٥	٣
٤٠	٣	٤	٥
٥٠	٤	٥	٦
٦٣	٥	٦	٧
٧٥	٥	٦	٧
٨٠	٦	٧	٨
١٠٠	٦	٨	١٠
١٢٥	٧	٨	١٠
١٦٠	١٠	١٢	١٥
٢٠٠	١٠	١٥	٢٠
٢٥٠	١٥	١٨	٢٢
٣١٥	١٨	٢٠	٢٥
٤٠٠	٢٠	٢٢	٢٨
٥٠٠	٢٠	٢٥	٣٠
٦٣٠	٣٠	٣٢	٤٠
٧٥٠	٣٠	٣٥	٤٥
١٠٠٠	٤٥	٥٠	٥٥

٣ ـ عند توصيل المكثف بصفة دائمة على جانب الجهد المنخفض من المحول (كما في شكل ٤ ـ ١١) فيجب ألا يزيد مقنن هذا المكثف عن (١٠ ـ ١٥٪) من مقنن المحول وذلك لتجنب ارتفاعات الجهد في حالات التحميل الخفيف أو حالة اللاحمل. ويبين الجدول ٤ ـ ٥ مقننات المكثفات الموصى بها لتحسين معامل قدرة المحولات عن طريق التوصيل المباشر المستمر على جانب الجهد المنخفض.



شكل ٤ ـ ١١ توصيل المكثف على جانب الجهد المنخفض للمحول.

٤ ـ يجب ملاحظة أن اختيار حجم المكثف يتأثر إلى حد كبير بوجود التوافقيات الناشئة سواء نتيجة لتشبع قلب المحول أو لوجود أحمال لاخطية تكون مصدراً لتلك التوافقيات. إن خطورة تلك التوافقيات ينتج أساساً من احتمال حدوث رنين resonance على إحدى هذه التوافقيات ممايعرض المحول

والمكثف لخطورة حدوث تجاوزات خطيرة في الجهد أو التيار. ويجب دراسة هذا الموضوع بعناية عند استعمال مكثفات على التوازي مع المحول.

٥ ـ إن التوصيل الدائم للمكثف على جانب الجهد المنخفض للمحول يرفع كلاً من جهد اللاحمل وجهد الحمل الكامل للمحول، إلا أنه لا يغير في مقدار تنظيم جهد المحول. وفي حالة الرغبة في تحسين تنظيم الجهد فيجب استخدام مكثفات ذاتية التحكم حيث تعمل هذه المكثفات في فترات الأحمال العالية وتفصل في فترات الأحمال الخفيفة واللاحمل.

٦ ـ إن توصيل مكثف على أطراف الجهد المنخفض للمحول يرفع جهد هذا المحول من على جانبيه. ويمكن حساب قيمة ارتفاع جهد أطراف المحول باستخدام المعادلة التقريبية الآتية:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{Q}{P} \, . X$$

حيث: Q: مقنن المكثف بالكيلوفار

P: مقنن المحول بالكيلوفولت أمبير

X: مفاعلة المحول بالمائة

ΔV: ارتفاع جهد أطراف المحول بالكيلوفولت

V: الجهد المقنن لأطراف المحول بالكيلوفولت.

٤.٤ أجهزة اللحام والأفران الكهربية

تتميز أجهزة اللحام والأفران الكهربية ببعض الخصائص التي يكون لها تأثير مباشر أو غير مباشر على منظومة التغذية. أهم هذه الخصائص هي ما يأتي:

١ ـ تحتاج تلك الأحمال إلى كميات كبيرة من التيار على جهود منخفضة، ويتم ذلك عن طريق استخدام محولات خافضة للجهد.

٢ ـ تمثل تلك الأجهزة أحمالاً غير متزنة بالنسبة للشبكة.

٣ ـ معامل القدرة لمثل تلك الأحمال منخفض بدرجة كبيرة.

٤ ـ تتسبب تلك الأحمال في حدوث ظـاهرة انغماس الجهد volatge dip ، وذلك نظراً لأنها أحمال متقطعة ذات تيارات عالية.

تحتاج عملية اختيار المكثف المناسب لتحسين معامل القدرة في أحمال أجهـزة اللحام والأفـران الكهربيـة إلى خبرة خـاصة وذلـك نظراً لـطبيعـة تلك الأحمال. ويتم ذلك عادة بالتعاون بين الشركة الموردِّة لتلك الأجهزة أو الأفران وبين المهندس المسئول عن تشغيلها على الشبكة بعد ذلك.

يمكن القول ـ بصفة عـامة ـ أنـه يتم تحسين معامـل قدرة أجهزة اللحام باستخدام مكثف توازي يوصل مع المحول وينفصل معـه. ويكون مقنن هـذا المكثف في حـدود ٥٠٪ من مقنن كيلوفولت أمبيـر المحول وذلـك في حالـة أجهزة الطور الـواحـد. أما في حالة أجهزة اللحام ثلاثية الأطوار فيكون المقنن أقل من ذلك.

يعطي الجدول (٤ ـ ٦) والجدول (٤ ـ ٧) قيماً نمطية يمكن الاسـترشاد بها في تحسين معامل قدرة أجهزة اللحام. كمـا يعطي الجـدول (٤ ـ ٨) تلك القيم في حالة الأفران الكهربية.

يمكن ـ علاوة على ما سبق ـ استخدام مكثفات التوالي لتحسين معامـل القدرة في منشآت اللحام الكبيرة وكذلك الأفران الكهربية. إن استعمال تلك المكثفات يمنع بصورة تلقائية انغماسات الجهد التي يكون لها تأثير ضار على باقي المستهلكين.

جدول ٤ ـ ٦ مقننات المكثفات لتحسين معامل قدرة أجهزة اللحام ذات محول أحادي الطور وبتشغيل منفرد

مقنن ك.ڤ.أ المتواصل	متوسط معامل القدرة قبل التصحيح	مقنن المكثف ك.ڤ.أ.ر	معامل القدرة بعد التصحيح
٩	٠,٣٥	٤	٠,٥٥
١٢	٠,٣٥	٦	٠,٦٢٥
١٨	٠,٣٥	٨	٠,٥٨
٢٤	٠,٣٥	١٢	٠,٠٦٢
٣٠	٠,٣٥	١٥	٠,٠٦٢
٣٦	٠,٣٥	١٨	٠,٠٦٢

جدول ٤ ـ ٧ مقننات المكثفات لتحسين معامل قدرة أجهزة اللحام ذات محـول ثلاثي الأطوار وبتشغيل متعدد.

النوع	أقصى مقنن ك.ڤ.أ	المقنن المتواصل ك.ڤ.أ	معامل القدرة قبل التصحيح	مقنن المكثف ك.ڤ.أ.ر	معامل القدرة بعد التصحيح
٣/٣٥٠	٩٥	٥٧	٠,٣٥	١٦,٥	٠,٤٨
٦/٣٥٠	١٩٠	٩٥	٠,٣٥	٣٠	٠,٤٩
٩/٣٥٠	٢٨٥	١٢٨	٠,٣٥	٤٥	٠,٥١
١٢/٣٥٠	٣٨٠	١٦٠	٠,٣٥	٦٠	٠,٥٣

جدول ٤ ـ ٨ مقننات المكثفات لتصحيح معامل قدرة أفران القوس الكهربي

مقنن محول الفرن ك.ق.أ	مقنن المكثف ك.ق.أ.ر
٥٠٠٠	٢٠٠٠ ـ ١٥٠٠
١٢٥٠٠	٥٠٠٠ ـ ٤٠٠٠
٣٠٠٠ ـ ٢٥٠٠٠	١٢٠٠٠ ـ ٧٥٠٠
٦٠٠٠٠ ـ ٥٠٠٠٠	٢٥٠٠٠ ـ ١٥٠٠٠
١٠٠٠٠٠	٤٥٠٠٠ ـ ٤٠٠٠٠
١٥٠٠٠٠	٧٠٠٠٠ ـ ٦٠٠٠٠

مواصفات التركيب
Installation Specifications

١.٥ مقدمة

تم تخصيص هـذا الباب لبيـان أهم المواصفـات واشتراطـات التـركيب والتشغيـل والحمايـة للمكثفات. كمـا يحتوي البـاب على بعض الاحتياطـات الواجب الانتباه لها جيداً عند استخدام المكثفات في تحسين معامل القدرة.

٢.٥ الطاقة المختزنة في المكثف

ذكرنا في البند (١ . ٥) أن المكثف يختزن طاقة كهـربية داخله مقـدارها ($\frac{1}{2}$ CV^2). عند فصل المكثف عن مصدر التغذية تظل هذه الطاقة مختزنة داخل المكثف. ومن الواجب تفريغ هذه الطاقة من المكثف وإلا فإن ذلك قد يعرض الأفراد المتعاملين مع المكثف إلى صدمات كهربية خطيرة، أو قد يؤدي قصـر الدائرة على المكثف إلى تَلَفه. تنص جميع المواصفات الخـاصة بـالمكثفات على ضرورة تفريغ تلك الطاقة. تنص المواصفة (NEC-460) على ضرورة تزويد المكثف بمقـاومة تفـريغ، وإذا لم يكن المكثف مـزوداً بتلك المقاومـة فيجب إيجاد وسيلة تفريغ تتصل بالمكثف تلقائياً بمجرد فصله عن المصدر.

يُزوَّد المكثف عادة بمفتاح خارجي يستخدم كوسيلة فصل، ويوجد بداخل هذا المفتاح جهاز تفريغ الطاقـة من المكثف. يتكون جهـاز التفريـغ عادة من

ملف ذي محاثة عالية ومقاومة صغيرة حتى لا يستهلك طاقة كهربية أثناء التشغيل العادي، وعند فصل المكثف فإن المقاومة الصغيرة تساعد على سرعة تفريغ المكثف.

تنص المواصفة (NEC-460) على ما يأتي:

يجب تزويد المكثف بوسيلة لتفريغ الطاقة التي بداخله بعد فصله عن المنبع تبعاً لما يأتي:

أ - المكثفات التي تعمل على جهد ٦٠٠ ڤولت أو أقل ينخفض جهدها إلى ٥٠ ڤولت أو أقل خلال دقيقة واحدة من لحظة الفصل أو أقل من دقيقة.

ب - المكثفات التي تعمل على جهد أعلى من ٦٠٠ ڤولت ينخفض جهدها إلى ٥٠ ڤولت أو أقل خلال فترة زمنية لا تتجاوز خمس دقائق من لحظة الفصل عن المنبع.

٣.٥ الموصلات

تسحب المكثفات عادة تياراً ثابتاً من المصد الموصلة عليه. إن هذا التيار يتعرض في أغلب الأحيان إلى زيادة قيمته بسبب ما يأتي:

١ - التغير في جهد المصدر والذي يصل إلى ١١٠٪ من الجهد العادي.
٢ - التغير في تردد المنبع (في حدود ± ٥,٠٪).
٣ - تأثير تيارات التوافقيات harmonic currents في الشبكة.
٤ - نسبة السماح التي يشير لها صانعو المكثفات على الصورة (15% + ,%0 −)، وهذا يعني أن المقنن الفعلي للمكثف لا يقل أبداً عن المقنن الإسمي له ولا يزيد عن١٥٪ من ذلك المقنن.

يتم اختيار مساحة مقطع الكابل الموصل للمكثف تبعاً لمقدار التيار المار فيه، والذي يتم حسابه بالطرق العادية تبعاً للعلاقة:

$$I = \frac{(KVAR)}{\sqrt{3}(KV)} \qquad (5.1)$$

حيث (KVAR) هو مقنن المكثف.

تنص المواصفة (NEC-460) على اختيار حجم الكابل على أساس تيار يساوي ١٣٥٪ من التيار المحسوب من المعادلة (5.1) وتختلف تلك النسبة في بعض المواصفات الأخرى ولكنها لا تقل عن ١٢٥٪ على وجه العموم، وذلك لمكثفات الجهد المنخفض (حتى ١٠٠٠ ڤولت). أما بالنسبة للمكثفات التي تعمل على جهود أعلى من ذلك فإن هذه النسبة تصل إلى ١٤٠٪. يعطي الجدول ٥ ـ ١ أحجام كابلات توصيل مكثفات الجهد المنخفض (كابلات

جدول ٥ ـ ١ أحجام كابلات المكثفات

(عازل PBC حتى ١٠٠٠ ڤولت) ثلاثة قلوب

موصل نحاس		موصل الومنيوم مصمت	
تيار المكثف (أمبير)	حجم الموصل (مم^2)	تيار المكثف (أمبير)	حجم الموصل (مم^2)
حتى ١٥	١,٥	—	—
١٦ ـ ٢٠	٢,٥	—	—
٢١ ـ ٢٦	٤	—	—
٢٧ ـ ٣٤	٦	—	—
٣٥ ـ ٤٧	١٠	—	—
٤٨ ـ ٦١	١٦	حتى ٤٦	١٦
٦٢ ـ ٨٠	٢٥	٤٧ ـ ٦١	٢٥
٨١ ـ ١٠٠	٣٥	٦٢ ـ ٧٤	٣٥
١٠١ ـ ١٢٤	٥٠	٧٥ ـ ٨٨	٥٠
١٢٥ ـ ١٥٢	٧٠	٨٩ ـ ١١٦	٧٠
١٥٣ ١٨٨	٩٥	١١٧ ـ ١٤٠	٩٥
١٨٩ ـ ٢١٦	١٢٠	١٤١ ـ ١٦٤	١٢٠
٢١٧ ـ ٢٤٨	١٥٠	١٦٥ ـ ١٨٨	١٥٠
٢٤٩ ـ ٢٨٤	١٨٥	١٨٩ ـ ٢١٦	١٨٥
٢٨٥ ـ ٣٣٦	٢٤٠	٢١٧ ـ ٢٥٦	٢٤٠
٣٣٧ ـ ٣٨٠	٣٠٠	٢٥٧ ـ ٢٩٦	٣٠٠
٣٨١ ـ ٤٤٠	٤٠٠	—	—

جدول ٥ ـ ٢ أحجام كابلات المكثفات
(عازل PVC حتى ١٠٠٠ ڤولت) قلب واحد

موصل نحاس		موصل الومنيوم مصمت	
تيار المكثف (أمبير)	حجم الموصل (مم^2)	تيار المكثف (أمبير)	حجم الموصل (مم^2)
٣٤١ ـ ٤٠٠	٢٤٠	٢٥٧ ـ ٣٠٠	٢٤٠
٤٠١ ـ ٤٥٦	٣٠٠	٣٠١ ـ ٣٤٤	٣٠٠
٤٥٧ ـ ٥١٢	٤٠٠	٣٤٥ ـ ٣٩٦	٣٨٠
٥١٣ ـ ٥٧٦	٥٠٠	٣٩٧ ـ ٤٤٨	٤٨٠
٥٧٧ ـ ٦٤٨	٦٣٠	٤٤٩ ـ ٥٠٤	٦٠٠
٦٤٩ ـ ٦٩٦	٨٠٠	٥٠٥ ـ ٥٦٨	٧٤٠
٦٩٧ ـ ٧٥٢	١٠٠٠	٥٦٩ ـ ٦٣٢	٦٩٠
		٦٣٣ ـ ٦٩٦	١٢٠٠

ثلاثية القلب three-core)، ويعطي الجدول ٥ ـ ٢ أحجام كابلات القلب الواحد single-core لتلك المكثفات. أما في حالة مكثفات الجهد العالي فيمكن الاسترشاد بالجدول ٥ ـ ٣. ويجب ملاحظة ما يأتي في تلك الجداول:

١ ـ بالنسبة للجدول ٥ ـ ١ فإن تلك القيم مبينة على أساس كابلات PVC موضوعة في الهواء بدرجة حرارة محيطة = ٣٠°م وأقصى درجة حرارة تشغيل مستمر = ٧٠°م. ويجب استعمال معاملات تقنين derating factors إذا تغيرت تلك الظروف.

٢ ـ بالنسبة للجدول ٥ ـ ٢، فإن الكابلات موضوعة في الهواء على شكل تلامس مثلثي trefoil ودرجة حرارة محيطة = ٣٠°م. والكابلات PVC بأقصى درجة حرارة تشغيل مستمر = ٧٠°م.

بالنسبة للجدول ٥ ـ ٣، فإن الكابلات المستعملة موضوعة في الهواء. وهي كابلات ثلاثية القلب. وقد تم الاختيار على أساس نسبة ١٤٠٪ من تيار المكثف.

جدول ٥ ـ ٣ أحجام كابلات مكثفات الجهد العالي (ثلاثة قلوب)

مساحة مقطع الموصل (مم٢)	موصلات الومنيوم مجدولة: أقصى تيار للمكثف (أمبير)	موصلات الومنيوم مجدولة: مقنن المكثف (م.ڤ.أ.ر) ١١ك.ڤ	موصلات الومنيوم مجدولة: مقنن المكثف (م.ڤ.أ.ر) ١٥ك.ڤ	موصلات نحاس مجدولة: أقصى تيار للمكثف (أمبير)	موصلات نحاس مجدولة: مقنن المكثف (م.ڤ.أ.ر) ١١ك.ڤ	موصلات نحاس مجدولة: مقنن المكثف (م.ڤ.أ.ر) ١٥ك.ڤ
١٦	٥٢	١,٠	—	٦٧	١,٢٥	—
٢٥	٦٧	١,٢٥	١,٧	٨٥	١,٦	٢,٢
٣٥	٧٨	١,٥	٢,٠	١٠٣	١,٩٦	٢,٦
٥٠	٩٦	١,٨	٢,٤	١٢٥	٢,٤	٣,٢
٧٠	١٢١	٢,٣	٣,١	١٥٧	٣,٠	٤,٠
٩٥	١٤٦	٢,٧	٣,٧	١٨٩	٣,٦	٤,٩
١٢٠	١٧١	٣,٢٥	٤,٤	٢٢١	٤,٢	٥,٧
١٥٠	١٩٢	٣,٦٥	٥,٠	٢٥٠	٤,٧	٦,٥
١٨٥	٢٢٥	٤,٢	٥,٨	٢٨٥	٥,٤	٧,٤
٢٤٠	٢٦٤	٥	٦,٨	٣٣٩	٦,٥	٨,٨
٣٠٠	٣٠٧	٥,٨	٨,٠	٣٨٥	٧,٣	١٠,٠
٤٠٠	٣٥٣	٦,٧	٩,٠	٤٤٢	٨,٤	١١,٥

٤.٥ التجاوزات المسموحة

رغم أن المكثفـات يتم تصنيعها تبعـاً لمقننـات محـددة وتحت ظـروف تشغيل معينة، إلا أن تلك المقننات وظروف التشغيل قد تتغير في أغلب الأحيان بحيث يؤدي ذلك إلى حدوث تجاوزات في التحميل على المكثف. يعتمد أداء المكثف على العوامل الآتية:

أ ـ الجهد.

ب ـ درجة حرارة الوسط المحيط.

حـ ـ خرج المكثف Output النهائي الذي قد يتغيـر تحت نفس ظروف الجهـد ودرجة الحرارة نتيجة لوجود تيارات التوافقيات.

١.٤.٥ تجاوز الجهد

تبعاً لمعظم المواصفات فإن المكثف يجب أن يعمل بطريقة سليمة عند جهد فعال بين طرفيه لا يتعدى ١١٠٪ من جهده المقنن. ومع هذا فإنه يمكن السماح لإمكانية حدوث تجاوزات أكبر في الجهد نتيجة لظروف التشغيل كما سبق توضيحه في الباب الرابع. ولهذا السبب فإن المواصفات تنص على ألا يقل جهد المكثف المقنن عن ٩٥٪ من أعلى جهد من المتوقع أن يتعرض له المكثف لفترة زمنية محسوسة.

تبعاً لما سبق فإنه من الموصى به أن يتم اختيار جهد المكثف المقنن أعلى قليلاً من جهد الشبكة المقنن، فيتم اختيار جهد المكثف ٢٣٠ ڤولت مثلاً لشبكة جهدها ٢٢٠ ڤولت و٤٠٠ ڤولت لشبكة جهدها ٣٨٠ ڤولت، وهكذا.

٢.٤.٥ تجاوز درجة الحرارة

تتأثر مقدرة المكثف على العمل تحت ظروف خدمة محددة بدرجة حرارة الوسط المحيط، حيث تعتمد درجة الحرارة النهائية التي يستقر عندها المكثف على مفقودات عزل المكثف ودرجة الحرارة الخارجية. يتم تصنيع معظم المكثفات تبعاً لتوصية اللجنة الدولية الكهروتقنية (IEC) كما يأتي:

أ - لا تتعدى درجة حرارة الوسط المحيط ٤٠°م.

ب - لا تتعدى القيمة المتوسطة لدرجة حرارة الوسط المحيط ٣٠°م على مدى فترة زمنية ٢٤ ساعة.

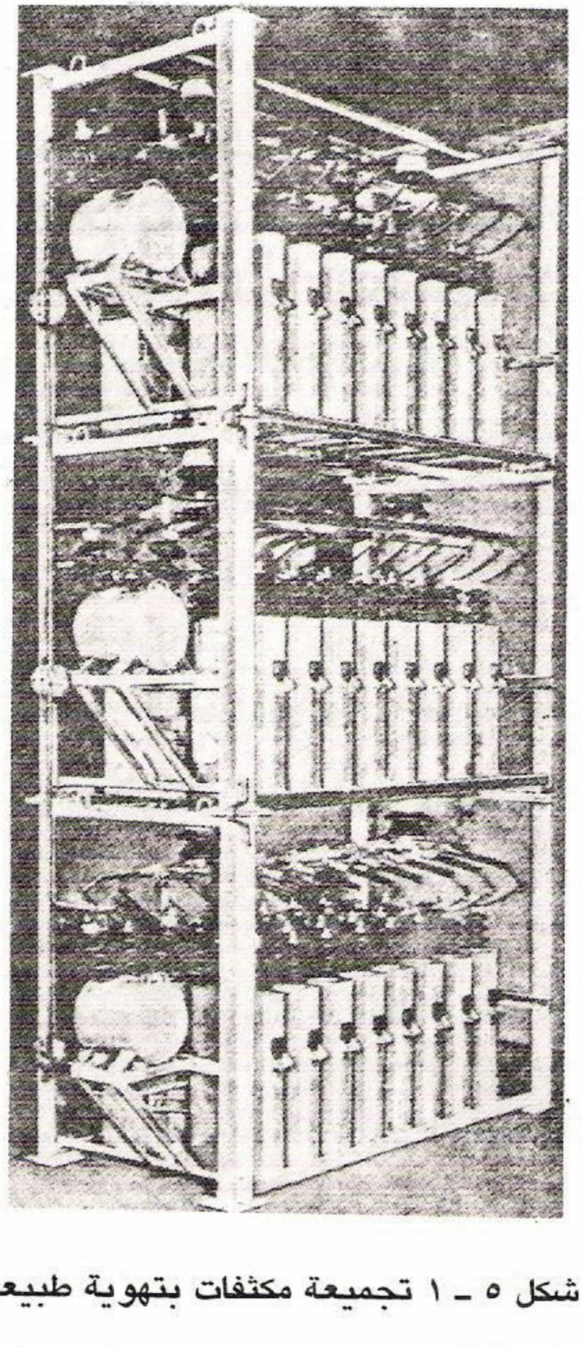
حـ - لا تتعدى القيمة المتوسطة لدرجة حرارة الوسط المحيط ٢٠°م على مدى فترة زمنية مقدارها عام كامل.

يقصد بدرجة حرارة الوسط المحيط درجة حرارة الهواء الملامس للمكثف وليس درجة حرارة الحجرة الموجود بها هذا المكثف. فإذا كان المكثف موضوع داخل خزانة مثلاً فإن درجة حرارة الوسط المحيط هي درجة حرارة الهواء داخل الخزانة.

إن ارتفاع درجة الحرارة عن تلك التي تم تصنيع المكثف عليها يؤثر على عمر عازل المكثف وبالتالي على عمر المكثف بأكمله. ويمكن مراعاة ما يأتي:

١ ـ الالتزام بقدر الإمكان بدرجات الحرارة المقننة للمكثف.

٢ ـ عدم وضع المكثفات في أماكن زائدة الحرارة. وتتم التهوية عادة بطريقة طبيعية وذلك عن طريق وضع تجميعات المكثفات بطريقة تساعد على تخلل الهواء بينها. ويتم ترك فراغات في حدود ١٠ سم بين كل وحدتين متجاورتين كما هو موضح بالشكل ٥ ـ ١.



شكل ٥ ـ ١ تجميعة مكثفات بتهوية طبيعية

٣ ـ يراعى عدم وضع المكثفات بجانب البطاريات، حيث تمثل البطاريات مصدراً من مصادر ارتفاع درجة الحرارة.

٤ ـ في حالة عدم إمكانية تحقيق الشروط السابقة فيجب تحديد درجة الحرارة المحيطة الفعلية وترتيب الأمر مع صانع المكثف لمراعاة ذلك.

٣.٤.٥ تجاوز التيار

ذكرنا في البند ٥ . ٣ أن المكثف قد يتعرض لتجاوز في التيار قد يصل إلى ١٣٥٪ من التيار المقنن. إن أي تجاوز في التيار يتسبب في زيادة مفقودات عازل المكثف مما يؤدي بالضرورة إلى رفع درجة حرارته. من الممكن أن يحدث تجاوز في التيار دون تغير في جهد أطراف المكثف نتيجة لحدوث تيارات على ترددات عالية وهي ما يُعرف باسم تيارات التوافقيات harmonic currents. وعند توقع حدوث مثل تلك التيارات فيجب مراعاة ما يأتي:

١ ـ تزويد مفتاح المكثف بمرحل حراري thermal relay يتم ضبطه بحيث يفتح دائرة المكثف إذا زاد التيار فيها عن ١٣٥٪ من التيار المقنن.

٢ ـ إذا كان من المؤكد وجود توافقيات عالية كما في حالة أحمال المقومات rectifiers وغيرها فإنه من الضروري عمل دراسة شاملة لهذا الموضوع لتحديد تلك التوافقيات ومقاديرها مع احتمال حدوث رنين resonance بين المكثف وأي جزء من الشبكة على إحدى هذه التوافقيات.

٣ ـ إن توصيل المكثف مباشرة على أطراف المحرك يسمح بمرور التوافقيات ودورانها بين المكثف والمحرك دون أي حماية. وعلى ذلك فإن هذا التوصيل غير مرغوب فيه عند توقع وجود تيارات التوافقيات.

٥.٥ الحماية والتحكم

يجب تزويد المكثف بوسيلة حماية ضد زيادة التيار (مصهر أو قاطع دائرة)، وذلك على كل موصل متصل بالمكثف إذا كان المكثف موضوعاً بين باديء الحركة للمحرك وبين مصدر التغذية. ويمكن الاعتماد على حماية تجاوز الحمل الخاصة بالمحرك والموجودة في باديء الحركة إذا كان المكثف موضوعاً بين المحرك وباديء الحركة.

عند استعمال وسيلة حماية خاصة بالمكثف فيجب اختيارها بأقل مقنن ممكن. فعند توصيل المكثف على الخط يكون التيار الابتدائي اللحظي عالياً، حيث يعمل المكثف غير المشحون كدائرة قصر في تلك اللحظة (راجع البند ١ ـ ٧). ويمكن اختيار مقنن وسيلة الحماية ٢٥٠٪ من مقنن تيار المكثف وذلك للحماية من تيار القصر. وعند اعتبار المكثف كحمل ثابت فإنه لا يحتاج إلى حماية تجاوز الحمل الخاصة به كما هي الحال في حالة المحركات التي تحتاج إلى هذا النوع من الحماية.

تزود معظم المكثفات بمصهرات داخلية للحماية من قصر الدائرة داخل المكثف نفسه. تقنن تلك المصهرات عادة من ١٦٥٪ إلى ٢٥٠٪ من مقنن تيار القدرة المردودة للمكثف وذلك للسماح بتخطّي تيار القفل اللحظي للمكثف والذي يمكن حسابه من العلاقة الآتية:

$$I = 1.15\, I_0 \left(1 + \sqrt{\frac{\text{Short Circuit KVA}}{\text{Capacitor KVAR}}}\right) \qquad (5.2)$$

حيث: I: أقصى تيار لحظي يمر في المكثف

I_0: القيمة الذروية Peak value لتيار المكثف المقنن.

ويعطى تردد التيار I بالعلاقة:

$$f_1 = f_0 \sqrt{\frac{\text{Short Circuit KVA}}{\text{Capacitor KVAR}}} \qquad (5.3)$$

حيث: f_1: تردد التيار I

f_0: تردد الشبكة الطبيعي.

يجب ملاحظة أنه في حالة زيادة تيار القفل اللحظي للمكثف عن عشرين ضعفاً من التيار المقنن فإن الحاجة تكون ضرورية للحد من هذا التيار الكبير. يتم استخدام مفاعلات توصل على التوالي بطريقة دائمة على كل خط من خطوط المكثف الثلاثة للحد من التيار وذلك في حالة مكثفات الجهد العالي. أما في حالة مكثفات الجهد المنخفض فيمكن استخدام إما مقاومات يتم توصيلها لحظة القفل وفصلها بعد ذلك، وإما مفاعلات كما في حالة مكثفات الجهد المنخفض.

إن قيمة تيار القفل اللحظي لا تتعدى في أغلب الأحيان عشرين ضعفاً من التيار المقنن وذلك على تردد حوالي ١٠٠٠ هرتز. إلا أنه قد تحدث ظاهرة تفريغ بين مكثف موصل فعلاً على الشبكة ومكثف آخر يتم توصيله على تلك الشبكة، حيث يمثل المكثف الجديد دائرة قصر لحظي للمكثف المشحون والموصل فعلاً على الشبكة. يمكن استخدام العلاقة الآتية لحساب التيار العابر الذي يمر عند توصيل المكثف على التوازي مع تجميعة مكثف موصل فعلاً على الشبكة بتردد f_0:

$$I_p = 2900 \sqrt{\frac{[(n-1)}{n} \times \frac{KVAR]}{L0}} \qquad (5.4)$$

حيث: n: عدد خطوات تجميعة المكثف

I_p: التيار العابر بالأمبير

KVAR: مقنن خطوة التجميعة لكل طور

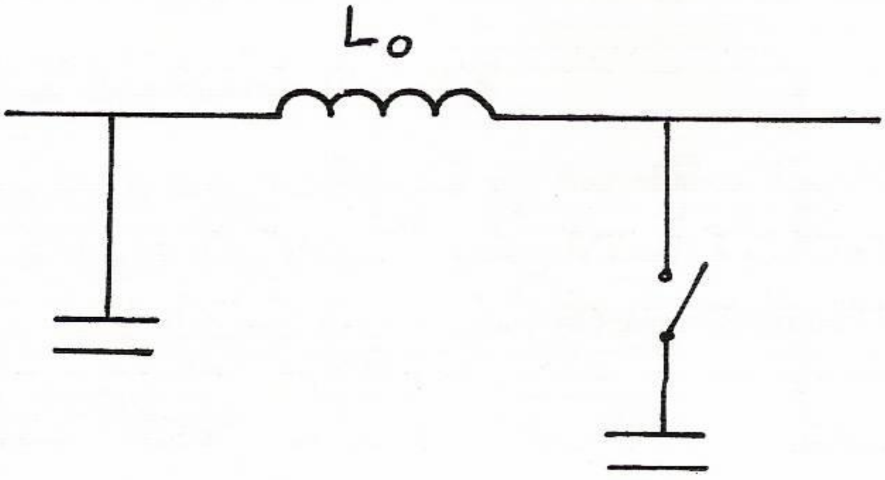
L_0: المحاثة بين خطوات التجميعة بالميكروهنري لكل طور، وتعطى العلاقة الآتية التردد (f) للتيار I_p.

$$f = \frac{126V}{\sqrt{L_0 \times KVAR}} \qquad (5.5)$$

حيث V الجهد المقنن الطوري بالڤولت (القيمة الفعالة).

يبين الشكل ٥ ـ ٢ دائرة توضح طريقة توصيل تجميعتي مكثفات على التوازي خلال محاثة L_0. يمكن استخدام القيم الآتية للمحاثة L_0 وذلك بصورة تقريبية:

الخطوط الهوائية: ١ ميكروهنري لكل متر لكل طور
كابلات ثلاثية القلب: ٠,٣ ميكروهنري لكل متر لكل طور
تجميعة المكثفات: ١ ميكروهنري لكل وجه
أجهزة الفصل: ١ ميكروهنري لكل وجه



شكل ٥ ـ ١ توصيل مكثف على مكثف موصل خلال محاثة.

عند توصيل المكثف على جانب الحمل فإن المصهرات الداخلية تكون كافية ولا يحتاج المكثف إلى مصهرات إضافية إلا في حالة استخدام تجميعة مكثفات فإن المصهرات الإضافية تكون ضرورية.

يجب أن تكون وسيلة فصل المكثف عديدة الأقطاب multipole حيث يجب فصل توصيلات المكثف جميعها معاً. كما يجب تأريض grounding الغلاف المعدني الخارجي للمكثف بطريقة سليمة.

يجب مراعاة ما يأتي عند توصيل المكثف على جانب المحرك:

أ ـ إعادة ضبط أجهزة الحماية والتحكم على أساس القيمة الفعلية الجديدة للتيار الذي سوف يمر في تلك الأجهزة كما سبق بيانه في الباب الرابع.

ب ـ قد يحدث أحياناً عند استخدام بادىء حركة نجمة ـ دلتا أن يرتفع صوت المحرك ولا يتمكن من اكتساب سرعته المقننة عندما يكون البادىء في

وضـع النجمة. إن ذلـك مرجعـة إلى حـدوث دائـرة رنين بين المحـرك والمكثف على تيار التوافقية الثالثـة. ويمكن التغلب على تلك المشكلة في حالة ظهورها بوضع مقاومات في موصلي طورين من الأطوار الثلاثـة للكابل الواصل بين المكثف وملفات المحرك. تؤخذ قيم هذه المقاومات بين ٣, ٠ أوم و ١ أوم. إن ذلك يساعد على تخميد تيارات التوافقيات.

٦.٥ الاختيار تبعاً للمواصفات الأمريكية

لا يختلف اختيار تجهيزات المكثف في المواصفات الأمريكية كثيراً عن مواصفات اللجنة الدولية الكهروتقنيـة. ويمكن الاستعانـة بالجـدول ٥ ـ ٤ في هذا الشأن، وهو إحدى النشرات الفنية لشركة (Fedral Pacific Electric Co.) تبعاً للمواصفة (NEC 460).

جدول ٥ ـ ٤ دليل اختيار تجهيزات المكثف

Capacitor Rating		Minimum cable and conduit sizes		Switching devices—minimum current ratings: Safety switch		Contactor	Molded-case ACB	Magnetic AC
kvar	amps	AWG or MCM	Conduit in.	Rating amps	Fuse amps	NEMA size	Trip-rating amps	Trip-rating amps
240-v, 3-PHASE SERVICE								
5	12.0	10	3/4	30	20	2	20	20
7.5	18.0	8	3/4	30	30	2	30	30
10	24.1	8	3/4	60	40	2	40	40
15	36.1	6	1	60	60	3	70	50
30	72.2	2	1 1/4	200	125	4	125	100
60	144	4/0	2 1/2	400	250	5	225	200
90	217	500	3	400	400	6	350	300
120	289	(2) 4/0	(2) 2 1/2	600	500	6	500	400
180	433	(2) 500	(2) 3	800	800	7	700	600
270	650	(3) 500	(3) 3	1,200	1,200	8	—	1,000
480-v, 3-PHASE SERVICE								
5	6.01	12	1/2	30	15	2	15	15
7.5	9.02	12	1/2	30	15	2	15	15
10	12.0	10	3/4	30	20	2	20	20
15	18.0	8	3/4	30	30	2	30	30
20	24.0	8	3/4	60	50	2	40	40
25	30.1	8	3/4	60	50	3	70	50
40	48.1	3	1 1/4	100	90	3	90	70
50	60.1	2	1 1/4	200	125	4	100	90
80	96.2	1/0	2	200	175	4	150	150
120	144	4/0	2 1/2	400	250	5	225	200
160	192	350	3	400	350	5	300	300
240	289	(2) 4/0	(2) 2 1/2	600	500	6	450	400
360	433	(2) 500	(2) 3	800	800	7	700	600

تابع جدول ٥ ـ ٤

600-v, 3-PHASE SERVICE

5	4.81	14	1/2	30	10	2	15	15
10	9.62	12	1/2	30	20	2	15	15
15	14.4	10	3/4	30	25	2	30	20
20	19.2	8	3/4	60	35	2	30	30
25	24.1	8	3/4	60	40	2	40	40
40	38.5	6	1	100	70	3	70	50
50	48.1	4	1 1/4	100	80	3	90	70
80	77.0	1	1 1/2	200	150	4	125	125
120	115	3/0	2	200	200	5	175	175
160	154	250	2 1/2	400	300	5	250	225
240	231	500	3	600	450	6	350	350
360	347	(2) 350	(2) 3	600	600	6	550	500

Notes:

1. Cable and conduit sizes are based upon three single-conductor, 600-v cables, (Type RH, RH-RW, RHW rubber and THW, THWH thermoplastic insulation) for each conduit.
2. The switching device should be selected for the fault duty of the system on which it will operate.
3. For kvar ratings in excess of table, consult manufacturer.

Table courtesy Federal Pacific Electric Co.

مراجع الكتاب

1 - T. Longland, T.W.Hunt, A. Brecknell, "Power Capacitor Handbook", Butterworths, 1984.

2 - I. Lazar, "Electrical Systems Analysis and Design for Industrial Plants", McGraw-Hill, 1980.

3 - Timoth J.E. Miller, "Reactive Power Control in electric Systems", J.W., 1982.

٤ ـ عبد المنعم موسى، «محولات القوى والتوزيع» دار الراتب الجامعية، ١٩٩٣.

5 - National Electrical Code Handbook, McGraw-Hill, 1990

6 - American Electricians' Handbook,. McGraw-Hill, 1992.

مجموعة كتب

الأسس العلمية والخبرة العملية في الهندسة الكهربية

تتضمن الكتب الموضوعات الآتية

- كابلات توزيع القوى الكهربية
- محولات التوزيع
- مكثفات القوى - تحسين معامل القدرة - التوافقيات
- الحماية والتنسيق في المنشآت الصناعية
- التأريض الوقائي والصناعي
- إضاءة المنشآت الصناعية والتجارية

شركة منشورات :
دار الراتب الجامعية

سجل تجاري ٤٧١٨٤ / بيروت

الادارة : بناية اسكندراني رقم (٣) الطابق (٢) مقابل مسجد الجامعة
المكتبة : بيروت - بناية سعيد جعفر - تجاه جامعة بيروت العربية

ص . ب : ١٩٥٢٢٩ بيروت / لبنان

تلفون : ٣٠٦٥٠٥ - ٣١٧١٦٩ - ٣١٣٩٢٣ - ص . ب . ١٩٥٢٢٩
تلكس RATEB 43917 LE